



António Miguel Fartaria Borges

Licenciado em Ciências da
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Desenvolvimento de um sistema electrónico de aquecimento para “sous vide”

Dissertação para Obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Nuno Filipe Silva Veríssimo Paulino, Prof. Doutor, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Rodolfo Alexandre Duarte Oliveira, Prof. Doutor, FCT-UNL

Arguentes: Luís Augusto Bica Gomes de Oliveira, Prof. Doutor, FCT-UNL

Vogais: Nuno Filipe Silva Veríssimo Paulino, Prof. Doutor, FCT-UNL

Desenvolvimento de um sistema electrónico de aquecimento para “Sous vide”

Copyright © António Miguel Fartaria Borges, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família e amigos

AGRADECIMENTOS

Começo por apresentar os meus agradecimentos ao meu orientador, Prof. Nuno Paulino, por todo o apoio, motivação e paciência prestado no decorrer desta dissertação. O professor apresentou-se sempre disponível para me ajudar a encontrar a melhor solução aos problemas que iam ocorrendo.

Agradeço também à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, nomeadamente ao departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores.

Aos meus grandes amigos e colegas Duarte Batista e Fábio da Silva, agradeço o companheirismo e colaboração ao longo destes últimos anos.

À Carolina Oliveira agradeço pela ajuda e paciência na elaboração desta dissertação.

Gostaria de agradecer à minha família, por todo o seu apoio e compreensão do mesmo modo no decorrer deste ano, bem como pela oportunidade que me concederam em poder frequentar este curso.

Finalmente, agradeço de forma abrangente a todos os meus colegas e amigos que de uma forma ou outra que contribuíram para a minha integração e aprendizagem.

RESUMO

A presente dissertação propõe o desenvolvimento de um sistema eletrónico de aquecimento para sous vide. Sous vide é um método de cozinhar a temperaturas precisas e baixas num longo período de tempo, permitindo realçar o sabor e a nutrição de um alimento.

Atualmente, a presença de tecnologia numa cozinha é uma realidade, havendo uma constante evolução e cada vez mais, maior ligação entre estas. Uma das características do uso de tecnologia nas cozinhas modernas é a facilidade com que hoje em dia é possível alcançar melhores resultados no que toca à confeção de receitas, destacando-se o uso de robôs e equipamentos que executam ou facilitam a realização de determinadas tarefas exigidas pelas mesmas.

Efetivamente quando se trata da cocção de um alimento, a temperatura e o tempo são fatores importantes, estando o nível de cozedura dependente dessas medidas. Desta forma, um controlo sobre a temperatura e o tempo resultará num controlo sobre a cozedura do alimento.

Assim esta dissertação foca o desenvolvimento de um projeto que visa cumprir os requisitos para auxiliar a prática do método sous vide. Ao longo do documento apresenta-se o estudo e os trabalhos tomados a cabo para construção de um sistema apto a aquecer água, e adquirir informação sobre a temperatura da mesma, processando-a de forma a contribuir para um controlo de temperatura da água.

Palavras-chave: Controlo de temperatura; Cozinha; Temperatura; Tempo; Sous vide;

ABSTRACT

This dissertation proposes the development of an electronic heating system for sous vide. Sous vide is a method of cooking at low and precise temperatures for a long period of time, allowing to enhance taste and nutrition.

Currently, the presence of technology in the kitchen is a reality, with a constant evolution and, greater connection between them. One of the characteristics of the use of technology in modern kitchens today, is the ease with which it is possible to achieve better results when it comes to the execution of recipes, such as the use of robots and equipment that perform or facilitate the accomplishment of certain tasks required by recipes.

In fact, when it comes to the cooking of a food, the temperature and time are important factors, since the cooking level depends on these measures. In this way, a control over temperature and time will result in control over the cooking level of the food

This dissertation focuses on the development of a project that aims to meet the requirements for the practice of sous vide method. Throughout the document presents the study and the work taken to build a system able to heat water, and acquire information about the same temperature, processing in order to contribute to the control of the water temperature.

Keywords: Kitchen; Temperature; Temperature Control; Time; Sous vide;

ÍNDICE

Resumo.....	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xxi
Lista de Acrónimos	xxiii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Sous vide	5
2.1.1 Water oven.....	7
2.1.2 Termocirculador	7
2.2 Visão do Mercado.....	8
2.2.1 Chefsteps.....	8
2.2.2 Anova	8
2.2.3 SousVide Supreme	9
2.2.4 Gourmia	9
2.3 Estruturação do Sistema	10
2.4 Módulo de Processamento	11
2.4.1 Microcontrolador.....	11
2.4.2 Teensy	11

2.4.3	Aquisição de Dados	12
2.4.4	Controlador PID	15
2.5	Módulo de Controlo	17
2.5.1	Optoacoplador	17
2.5.2	TRIAC	18
3	Estudo Teórico	19
3.1	Transiente da Condução de Calor	19
3.2	Modelação do Sistema	21
3.3	Modelo Discreto do Controlador PID	24
3.4	Sintonização do Controlador	26
4	Sistema Proposto	29
4.1	Módulo de Processamento	29
4.1.1	Sensor de temperatura	30
4.1.2	Interface de Utilizador	32
4.1.3	Controlador PID	33
4.1.4	PWM	34
4.2	Módulo de controlo	35
4.3	Custo de Produção	36
5	Implementação do sistema	39
5.1	Módulo de processamento	39
5.1.1	Sensor	39
5.1.2	Interface de utilizador	40
5.1.3	Controlador PID	42
5.1.4	Circuito Eletrónico do Módulo de Processamento	44
5.1.5	PCB do Módulo de Processamento	45
5.1.6	Código	46
5.2	Módulo de controlo	48
5.2.1	Circuito Eletrónico do Módulo de Controlo	48
5.2.2	PCB do Módulo de Controlo	48
5.3	Construção do sistema	51
5.3.1	Adaptação sensores	51
5.3.2	PCB's e ligações	51

5.3.3	Caixa.....	53
5.3.4	Produto final.....	53
6	Resultados experimentais.....	55
6.1.1	Calibração do Controlador.....	58
6.1.2	Desempenho do Sistema.....	59
7	Conclusão e desenvolvimento Futuro.....	61
7.1	Trabalho Futuro.....	62
	Bibliografia.....	63
A	Resultados de Receitas.....	65
B	Código de Programação.....	69
C	Teensy 3.2.....	77
D	PCB's e Respetivos Circuitos Eletrónicos.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Cocção usando o método Sous vide. [4]	1
Figura 1.2 - Cocção usando uma frigideira. [4]	1
Figura 2.1 - Exposição de diferentes temperaturas a um ovo, durante o período de uma hora, na prática de sous vide [1].....	6
Figura 2.2 - Exposição de diferentes intervalos de tempo de confecção a um ovo, a uma temperatura de 60 °C, na prática de Sous vide [1].....	6
Figura 2.3 - SousVide Supreme Water oven [6].	7
Figura 2.4 - Termocirculador Chefsteps Joule [7].	7
Figura 2.5 - Diagrama de blocos do sistema eletrónico.	10
Figura 2.6 - Montagem de uma termorresistencia a três fios.	14
Figura 2.7 - Esquema de blocos de um controlador PID [17].....	16
Figura 2.8 - Esquemático do MOC3063 [19].	17
Figura 2.9 - Esquemático e símbolo do TRIAC [21].....	18
Figura 2.10 - Quadrantes de desencadeamento de um TRIAC [22].	18
Figura 3.1 - Modelo do sistema de aquecimento.	21
Figura 3.2 - Modelo elétrico equivalente do sistema de aquecimento.	22
Figura 3.3 - Resposta do sistema a um degrau (P=10%).....	23
Figura 3.4 - Resposta do sensor a um degrau.....	24
Figura 3.5 - Diagrama de lugares das raízes do sistema.	26
Figura 3.6 – Diagrama de lugares das raízes do sistema com controlo PID.....	27
Figura 3.7 - Resposta teórica do sistema com controlo PID a um degrau de amplitude 45.	27
Figura 4.1 - Diagrama de blocos do módulo de processamento.....	30
Figura 4.2 - Métodos de alimentação do sensor DS18B20 [24].....	31
Figura 4.3 - Fluxograma do Menu.	32
Figura 4.4 - Circuito de controlo.....	35
Figura 4.5 - Diagrama de blocos do módulo de controlo	36

Figura 5.1 - Montagem <i>Pull-up</i> .	41
Figura 5.2 - Conexão entre o microcontrolador e LCD.	41
Figura 5.3 - LCD em modo activo.	42
Figura 5.4 - LCD em modo de configuração.	42
Figura 5.5 - Resultado do controlador com o método da sensibilidade ultima de Ziegler-Nichols.	43
Figura 5.6 - Circuito eléctrico do módulo de processamento.	44
Figura 5.7 - Layout PCB do módulo de processamento.	46
Figura 5.8 - Circuito do módulo de controlo no <i>software</i> Autodesk Eagle.	49
Figura 5.9 - Circuito de Controlo resultante ao corte.	50
Figura 5.10 - Circuito de controlo activo.	50
Figura 5.11- Layout PCB do módulo de controlo.	51
Figura 5.12 - Interior da caixa do sistema.	52
Figura 5.13 - Interior da caixa e respectiva tampa do sistema.	52
Figura 5.14 – Vista superior da tampa do sistema.	53
Figura 5.15 - Organização do aquecedor e sensores dentro da panela.	54
Figura 6.1 - Desempenho do sistema a uma temperatura de 66°C.	55
Figura 6.2 - Oscilação da temperatura a uma temperatura alvo de 66 °C.	56
Figura 6.3 - Oscilação do sistema, em estado permanente, na zona do controlador.	57
Figura 6.4 - Oscilação do sistema, em estado permanente, na zona de colocação do alimento.	57
Figura 6.5 -Oscilação do sistema, em estado permanente, na zona do controlador afinado.	58
Figura 6.6 - Oscilação do sistema, em estado permanente, na zona de colocação do alimento.	59
Figura 6.7 - Progressão na textura da gema com o aumento da temperatura.	59
Figura 6.8 - Resultado de uma perturbação no sistema que se encontra a uma temperatura de 63°C.	60
Figura A.1 - Bife da zona da maminha da Alcatra cozinhado a uma temperatura de 54 °C durante uma hora.	65
Figura A.2 – Cortes de um bife da zona da maminha da Alcatra cozinhado a uma temperatura de 54 °C durante uma hora.	66
Figura A.3 - Peito de frango cozinhado a uma temperatura de 65 °C durante uma hora.	66
Figura A.4 – Cortes de um peito de frango cozinhado a uma temperatura de 65 °C durante uma hora.	67
Figura A.5 - Ovo cozinhado a uma temperatura de 66 °C durante 45 minutos.	67
Figura C.1 - Vista superior do microcontrolador Teensy 3.2.	77

Figura C.2 - Vista inferior do microcontrolador Teensy 3.2.....	78
Figura D.1 - Esquemático electrónico do módulo de controlo.	79
Figura D.2 - Vista superior da PCB do módulo de controlo.	79
Figura D.3 - Vista inferior da PCB do módulo de controlo.....	79
Figura D.4 - Circuito electrónico do módulo de processamento.	80
Figura D.5 - Vista superior da PCB do módulo de processamento.....	81
Figura D.6 - Vista inferior da PCB do módulo de processamento.	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações Teensy 3.2 [13].	12
Tabela 4.1 - Tempo de conversão máximo em função da resolução do sensor DS18B20 [24].....	31
Tabela 4.2 - Conexões LCD.	33
Tabela 4.3 - Lista de componentes e respectivos preços.....	37
Tabela 5.1 - Parametros do controlador através do método de Ziegler-Nichols.....	44

LISTA DE ACRÓNIMOS

PID – Proportional Integral Derivative
LCD – Liquid Crystal Display
TRIAC – Triode for Alternating Current
USB – Universal Serial Bus
RAM – Random Access Memory
EEPROM – Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
ADC – Analog to Digital Converter
DAC – Digital to Analog Converter
PWM – Pulse Width Modulation
RTD – Resistance Temperature Detector
NTC – Negative Temperature Coefficient
PTC – Positive Temperature Coefficient
IRED – Infrared Emitting Diode
AC – Alternating Current
LED – Light Emitting Diode
PCB – Printed Circuit Board
DC – Direct Current
ASCII – American Standard Code for Information Interchange

INTRODUÇÃO

Sous vide¹ é um método que é usado para cozinhar alimentos, selados a vácuo num saco, a baixas temperaturas e num longo período de tempo. Este método diferencia-se dos métodos convencionais uma vez que o alimento está selado a vácuo num saco e é confeccionado a uma temperatura precisamente controlada, resultando um alimento saboroso e nutritivo [1].

O embalamento a vácuo tem um papel importante uma vez que permite a transferência de calor, entre a água e o alimento, se realize de forma mais eficiente e previne a transferência de sabores que possam estar contidos na água [2].

Do mesmo modo, uma temperatura precisa e exata pode ser crucial, uma vez que resulta numa cocção consistente em todo o alimento (Figura 1.1). Caso esta condição não se verifique, como quando se usa uma grelha a altas temperaturas, obtém-se como resultado um alimento excessivamente cozinhado no seu exterior e malcozinhado no seu interior (Figura 1.2) [3].

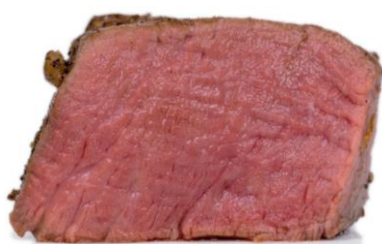


Figura 1.1 - Cocção usando o método Sous vide. [4]



Figura 1.2 - Cocção usando uma frigideira. [4]

¹ Sous vide, que em francês, significa “sob vácuo” e pronuncia-se suvid.

O método sous vide pode ser dividido em quatro etapas, nomeadamente:

- Temperar
- Embalar
- Cozinhar
- Servir

Temperar um alimento pode ser complicado quando se utiliza o método Sous vide, uma vez que este tem um efeito de amplificação do sabor de algumas especiarias [3]. Após tempero do alimento procede-se ao seu embalamento que consiste em inserir o alimento num saco e selá-lo a vácuo. Durante este processo é recomendado o uso de uma máquina de vácuo, no entanto, existe um método secundário, que consiste em mergulhar um saco, de fecho fácil, com o alimento no seu interior num recipiente com água e selá-lo quando não estiver praticamente ar dentro do saco. Embora menos eficiente, é possível obter um resultado semelhante.

Tendo o alimento temperado e embalado procede-se à cocção do mesmo. Nesta etapa, a embalagem é inserida no sistema, que se deve apresentar à temperatura recomendada pela receita. Após o cumprimento do tempo dito pela a receita e a devida retirada do alimento do sistema, este pode passar por um processo de alourar o seu exterior [3]. Para tal pode ser utilizado um maçarico ou frigideira. De notar que este último processo toma como principal objetivo melhorar a apresentação do alimento.

1.1 Enquadramento e Motivação

A prática de sous vide é possível em sistemas banais nas cozinhas, porém, pode ser difícil realizá-lo de forma correta, e pode requerer dispositivos adicionais, uma vez que o controlo da temperatura do alimento, ou é realizado manualmente ou de forma automática, mas com uma variação significativa da temperatura.

A motivação desta dissertação é o desenvolvimento de um sistema eletrónico de aquecimento, que permita a prática de sous vide compatível com a maioria das receitas, ou seja, um sistema que permita uma temperatura precisa e uniforme para cada alimento. Adicionalmente, o sistema permite uma regularização da temperatura e de um temporizador.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um sistema eletrónico apto a reproduzir receitas sous vide. Como tal, requer-se que exista controlo sobre a temperatura e o tempo. Sendo que não está determinado nem um limite máximo para a oscilação da temperatura, nem um desvio máximo da temperatura, é assumido que o desvio máximo de temperatura, que o sistema deve produzir, deverá ser aproximadamente de 1 °C, pois sendo o ovo um alimento muito sensível à variação da temperatura, se este sofrer um desvio de 1 °C, diferenças significantes são notadas na sua textura.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos e quatro apêndices, onde o primeiro capítulo aborda o tópico da dissertação. No capítulo 2 é apresentado uma revisão da literatura dos possíveis constituintes e mercado relacionado com *Sous vide*. O capítulo 3 aborda a teoria do transiente da condução de calor, modelação do sistema, modelação do controlador PID e sintonização do controlador PID. O capítulo 4 apresenta os componentes propostos para o projeto, como a sua implementação a alto nível. O capítulo 5 relata os processos realizados na construção do projeto. Por fim, o capítulo 6 apresenta os resultados obtidos pelo projeto e o capítulo 7 apresenta as considerações finais sobre o projeto e potenciais trabalhos futuros a serem considerados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sous vide

Sous vide retrata um método de cozinhar baseado na cocção de um alimento contido num saco selado a vácuo, durante um período de tempo e a uma determinada temperatura. Este método de cocção difere do tradicional, uma vez que o alimento é confeccionado com precisão e consistência, a uma temperatura indicada pela a receita. Uma constante oscilação e discrepância da temperatura pode vir a corromper a receita [3].

Tradicionalmente, na preparação de uma refeição, os alimentos estão em contacto com o meio aquecedor (frigideira, ar no interior de um forno), sendo que este se apresenta a temperaturas superiores às desejáveis para os alimentos, que por consequência reduz o intervalo de tempo em que se considera que o alimento está devidamente bem cozido. Sendo que o retiro do alimento antes ou depois do momento correto, leva à falta ou excesso de cozedura do mesmo. A cocção dos alimentos com o recurso a água, em vez de ar, resulta num controlo mais eficiente e prático sobre a temperatura do alimento [5]. Isto deve-se ao facto de a água possuir uma condutividade térmica superior à do ar.

Uma vez que é possível submergir o saco, com o alimento no seu interior, a cocção permite uma textura uniforme ao longo do alimento, pois este está rodeado por água, em que toda ela está aproximadamente à mesma temperatura [2].

É de notar que a exposição de diferentes temperaturas, na prática de sous vide, a um alimento, tem como consequência diferentes texturas como se verifica na Figura 2.1.

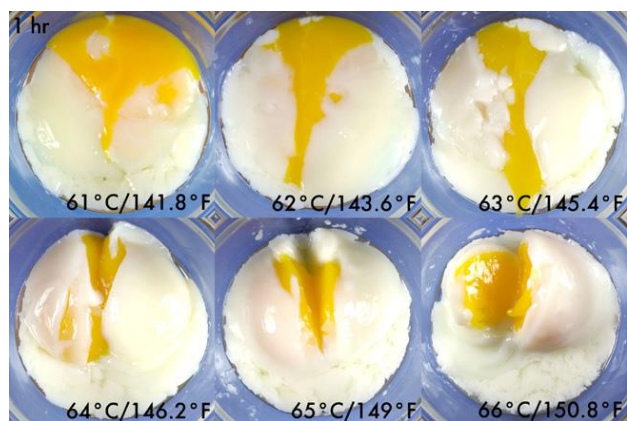


Figura 2.1 - Exposição de diferentes temperaturas a um ovo, durante o período de uma hora, na prática de sous vide [1].

Resultados similares ocorrem quando expondo um alimento, na prática de sous vide, à mesma temperatura durante diferentes intervalos de tempo, com se pode observar na Figura 2.2. Denota-se que após um determinado intervalo de tempo, a textura do alimento em questão, não sofre alterações significativas na sua textura, verificando um aumento do controlo sobre a textura do alimento.

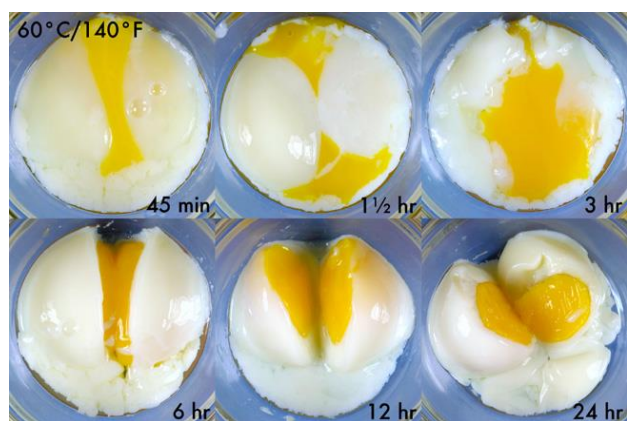


Figura 2.2 - Exposição de diferentes intervalos de tempo de confecção a um ovo, a uma temperatura de 60 °C, na prática de Sous vide [1].

A prática de sous vide pode ser realizada por dois métodos. Um método considera que a temperatura da água deve ser um pouco maior que a temperatura do alimento, enquanto que o outro método considera que a temperatura da água deve ser significativamente superior à temperatura final desejada para o centro do alimento [3].

Inicialmente, as máquinas destinadas à prática de sous vide, eram desenhadas para a prática industrial, de maneira que, a prática de sous vide em casa ocorria ou com o investimento numa máquina industrial, que por sua vez é dispendiosa e talvez exagerada para uso quotidiano de uma família, ou com invenções improvisadas de forma a obter resultados similares. No entanto, com o aumento da popularidade desta técnica, diversas empresas começaram a apostar em máquinas de uso doméstico. Surgiu então os water ovens e os termocirculadores (Figura 2.3 e Figura 2.4) [2].



Figura 2.3 - SousVide Supreme Water oven [6].



Figura 2.4 - Termocirculador Chefsteps Joule [7].

2.1.1 Water oven

Um *water oven* é um equipamento com todas as funções necessárias para a prática de sous vide, não requerendo objetos adicionais. Tem como vantagem, uma zona que reserva e aquece água. Sendo que o elemento aquecedor, tipicamente está contido no fundo da unidade e estrategicamente posicionado, de modo a alcançar um aquecimento uniforme. Alguns equipamentos possuem separadores que permitem confeccionar diversos alimentos ao mesmo tempo, sem contacto entre eles [2].

As linhas de equipamentos SousVide Supreme e Gourmia GSV são as mais populares e usadas, aptas a aquecer os alimentos rapidamente e uniformemente, com possibilidade de confeccionar mais que um alimento, ao mesmo tempo [2]. Estas marcas disponibilizam equipamentos de diversos tamanhos, de forma a adequar-se ao estilo de vida de cada pessoa. A maioria dos equipamentos possuem separadores, caso necessário a confeção de diversos alimentos, de modo a não haver contacto e as suas texturas se apresentem uniformes.

2.1.2 Termocirculador

Um termocirculador é um equipamento apto à prática de Sous vide, requerendo um recipiente, ao qual o equipamento é devidamente anexado. É de notar que os recipientes, a usar, devem respeitar algumas dimensões, por forma a que o equipamento não fique nem submerso nem excessivamente fora de água. É necessário ter em conta a quantidade mínima e máxima de água que o equipamento permite operar.

Este tipo de equipamento possui um motor responsável pela circulação da água, uma vez que o elemento aquecedor, deste tipo de equipamento, não permite um aquecimento uniforme da água. Alguns equipamentos já possuem módulos *Wi-Fi* ou *Bluetooth*, permitindo controlo através de um dispositivo compatível [2].

Em relação ao *water oven*, o termocirculador é um sistema mais económico e compacto, permitindo ser facilmente transportado e armazenado. Ideal para cozinhas pequenas [2].

No que toca à confeção de refeições, o termocirculador é apto a tal, mesmo quando destinado a uma família de tamanho normal [2].

Chefsteps Joule e Anova Precision Cooker são os equipamentos desta categoria que mais fama apresentam. Ambos os equipamentos possuem uma aplicação para o smartphone, que permite o contacto, através de *Wi-Fi* ou *Bluetooth*, com o termocirculador. A aplicação possui diversas funcionalidades, sendo que a principal é o envio de informação para o termocirculador, mas receitas de refeições, guias de ajuda, notificações do estado do equipamento, partilha de receitas, tutoriais em vídeo também se pode encontrar.

2.2 Visão do Mercado

Nesta secção são descritas diversas empresas com produtos, destinados à confeção de refeições através do método sous vide e é realizado um estudo e comentário sobre os seus produtos no mercado.

2.2.1 Chefsteps

Chefsteps é uma empresa de fabrico de produtos para cozinhas inteligentes. Em 2016, lançaram o Joule, uma máquina sous vide de tamanho reduzido, com base magnética, permitindo que a máquina fique firme em alguns recipientes. Esta máquina é controlada por um dispositivo conectado por *Wi-Fi* ou *Bluetooth*, desde que contenha a aplicação Joule. A aplicação Joule permite controlar a temperatura de referência da máquina, impor temporizadores, tem guias de ajuda e receitas de forma a simplificar o uso. Quanto ao botão no topo da máquina, este serve para desligar, ligar e emparelhar a máquina [7].

O Joule fornece precisão de temperatura de 0,1 °C, temperatura máxima da água de 98 °C e um volume máximo de água de cerca de 40 litros, sendo que a profundidade mínima é de 38 mm e máxima de 203 mm. Este também possui de um motor responsável pela a circulação da água de modo a alcançar uma temperatura uniforme da água [7].

O dispositivo que controla o Joule tem que possuir Android ou iOS, tendo em conta que a versão de Android tem que ser a 4.4 ou mais atual e a versão de iOS tem que ser a 8.0 ou mais atual. A comunicação entre o dispositivo e o Joule é realizado ou por *Bluetooth Smart 4.0* ou por *Wi-Fi* [7].

Em termos de segurança, o Joule possui proteção a sobreaquecimento e a excesso de corrente. É de notar que a alimentação deve ser entre os 100 e 120 V e o aquecedor é de 1100 W.

2.2.2 Anova

Anova é uma empresa de fabrico de produtos para cozinhas inteligentes. Possui um produto, Anova Precision Cooker.

Anova Precision Cooker é uma máquina sous vide que controla a temperatura da água com boa precisão, numa gama de temperaturas de 25 a 99 °C, com uma precisão de 0,01 °C [8].

Esta máquina é produzida em duas versões, uma pode ser controlada por *Bluetooth BLE 4.0* e diretamente na máquina e a segunda versão pode ser controlada por Wi-Fi ou diretamente na máquina. Em ambas as versões, o dispositivo que controla a máquina, no caso de controlo por Bluetooth ou *Wi-Fi*, deve possuir a aplicação Android ou iOS recomendada. A versão Bluetooth possui uma potência de 800 W permitindo servir 7 ou 8 pessoas, enquanto que a versão *Wi-Fi* possui uma potência de 900 W permitindo servir 10 ou 12 pessoas [8], [9].

2.2.3 SousVide Supreme

SousVide Supreme é uma empresa de fabrico de produtos destinados à prática de Sous vide, como seladores a vácuo, water ovens e livros de receitas.

No contexto do projeto é dado foco aos water ovens, que são diferenciados em dois produtos: SousVide Supreme Demi Water Oven e SousVide Supreme Water Oven Stainless Steel.

SousVide Supreme Water Oven Stainless Steel foi o primeiro water oven desenhado especificamente para a prática de Sous vide em casa [6].

Este produto é capaz de controlar precisamente a temperatura operando silenciosamente, uma vez que não necessita de um motor para a circulação da água. Admite um volume máximo, em que consegue operar, de 10 litros [6].

Este produto controla a temperatura com recurso a um controlador PID, permitindo uma precisão de 0,5 °C e uma gama de temperaturas entre 30°C e 99°C [6].

SousVide Supreme Demi Water Oven é semelhante ao produto anterior, apenas com diferenças nas dimensões, volume máximo de operação e revestimento exterior. No que toca ao volume máximo de operação, este é de 9 litros uma vez que as dimensões mais reduzidas. O revestimento exterior deste produto é em aço revestido, em vez de aço inoxidável como no SousVide Supreme Water Oven Stainless Steel [10].

2.2.4 Gourmia

Gourmia é uma empresa de fabrico de ferramentas para cozinhas. As suas ferramentas são desenhadas com intuito de cozinhar de forma fácil e saudável.

Esta empresa desenvolve diversos utensílios de cozinha, no entanto será dado foco aos utensílios destinados à prática de Sous vide. Utensílios estes, consistem em circuladores por imersão e water ovens, que estão distribuídos em duas gamas de utensílios, GMC e GSV.

A gama GMC consiste em utensílios destinados à prática de diversos estilos de cozinha, sendo Sous vide uma delas. Esta gama é composta pelos produtos GMC650 e GMC680 com capacidade de 6 litros, elemento aquecedor de 1250 W, tampa em vidro temperado e o seu interior é composto por alumínio antiaderente [11].

A gama GSV é destinada exclusivamente à prática de sous vide e composta por termocirculadores (GSV130, GSV138, GSV140 e GSV150) e por water ovens (GSV900 e GSV550). Os termocirculadores apresentam precisões na temperatura entre 0,01°C e 0,5°C, consoante o modelo, são compostos por um elemento aquecedor de 1200 W de potência. Apenas o modelo GSV150 apresenta a

possibilidade de controlo via *Wi-Fi*, enquanto que os outros modelos seguem um controlo da temperatura e temporizador através da interface disponível no equipamento [11].

2.3 Estruturação do Sistema

Verificando-se que a temperatura é um fator crítico e de extrema importância no processo de sous vide, esta deve ser considerada aquando do dimensionamento do sistema eletrónico de aquecimento para sous vide. Com isto, considere-se o seguinte sistema eletrónico, que se apresenta dividido em dois módulos, nomeadamente:

- Processamento, responsável pelo controlo da temperatura da água e interação com o utilizador.
- Controlo, responsável pela ativação e desativação do elemento aquecedor.

Na Figura 2.5 está representado o diagrama de blocos do sistema a implementar, que apresenta a relação entre os vários componentes do sistema. Sendo que o módulo de processamento é composto pelo microcontrolador, LCD, botões e sensor de temperatura. E o módulo de controlo é composto pelo optoacoplador e o TRIAC.

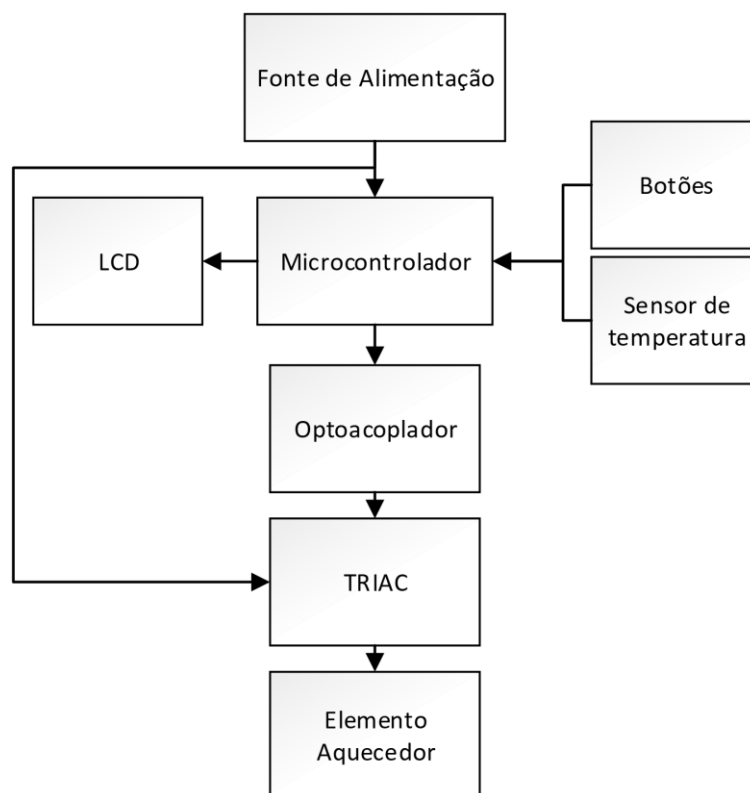


Figura 2.5 - Diagrama de blocos do sistema eletrónico.

2.4 Módulo de Processamento

O módulo de processamento que visa controlar a temperatura da água e a decifrar a interação do utilizado, necessita de um algoritmo de controlo de forma a obter um controlo eficiente e estável da temperatura. Sendo que este algoritmo irá estar programado num microcontrolador, em conjunto com o algoritmo de interação com o utilizador, e tem como meio de informação, um ou mais sensores de temperatura.

2.4.1 Microcontrolador

O termo microcontrolador representa um sistema composto por entradas e saídas de informação, um microprocessador e memória. Alguns microcontroladores podem incluir ainda temporizadores, contadores, conversores analógico-digitais (ADC), entre outros componentes. O seu funcionamento, de forma simplificada, consiste na execução de um programa, desenvolvido pelo o utilizador, interagindo ou não com as suas saídas e/ou entradas.

Os microcontroladores são cada vez mais usados em projetos, uma vez que permitem simplificar e compactar os circuitos destes e além disto podem ser facilmente reutilizados.

2.4.2 Teensy

Teensy é uma gama de microcontroladores, distribuída pela PJRC, que contém *bootloader*, permitindo que a programação no microcontrolador seja efetuada através da porta micro USB (Universal Serial Bus) , não requerendo qualquer dispositivo programador adicional. A programação pode ser realizada através do *software* Arduino IDE, sendo necessária a instalação do *add-on* Teensyduino e do *software* Teensy Loader [12].

O *add-on* Teensyduino é responsável pela a compatibilidade entre o Arduino IDE e os microcontroladores Teensy, enquanto que o *software* Teensy Loader desempenha o papel de envio do código compilado para o microcontrolador.

Estes microcontroladores são compatíveis com a maioria das bibliotecas do Arduino e permitem que a porta Micro USB seja usada para emular o funcionamento de um teclado, um rato ou outros dispositivos.

O Teensy 3.2 é um modelo que foi desenvolvido com o intuito de substituir o Teensy 3.1, onde a diferença mais notória entre os dois modelos surge na gama de valores de tensão de alimentação e corrente máxima fornecida pelo pino de 3,3 V.

O Teensy 3.2 é um microcontrolador de 32-bit composto por um processador MK20DX256VLH7, com núcleo Cortex-M4 apto a operar a 72 MHz ou 96 MHz no caso de se submeter a um *overclock*. Este microcontrolador dispõe de 34 pinos de entrada/saída de dados, sendo 21 compatíveis com sinal analógico, dois ADC's e um conversor digital-analógico (DAC), e possibilita a utilização de protocolos de comunicação CAN, I2C, I2S, UART ou SPI como protocolo de comunicação. Na Tabela 2.1 é possível analisar com mais detalhe algumas das características deste microcontrolador.

Este microcontrolador disponibiliza ainda um pino de programação, que reinicia o microcontrolador em modo *bootloader*, e um pino *reset* que permite reiniciar a aplicação quando for conveniente.

Tabela 2.1 - Especificações Teensy 3.2 [13].

Teensy 3.2	
Processador	MK20DX256VLH7
Núcleo	Cortex-M4
Frequência de trabalho	72 MHz
Memoria Flash	256 kB
RAM	64 kB
EEPROM	2 kB
Pinos de saída ou entrada	34 Pinos
Tensão à saída	3.3 V
Tensão de entrada	5 V
Entradas Analógicas	21 Pinos
ADC	2
Resolução	16 Bits
Saídas Analógicas	1 Pino
DAC	1
Resolução	12 Bits
Temporizadores	12
Saídas PWM	12

2.4.3 Aquisição de Dados

O controlo da temperatura de um sistema pode ser realizado com mais facilidade, se houver retorno de informação por parte do sistema em causa; ou seja, é possível controlar a temperatura de um sistema com maior precisão se for conhecido o valor da sua temperatura atual e do impacto que o elemento aquecedor tem no sistema. Desta forma, a presença de um ou mais sensores de temperatura é indispensável; alguns exemplos que são apresentados de seguida são: termómetros de expansão, termorresistências, termístores, termopares, circuitos integrados, pirómetro e termómetros de quartzo.

2.4.3.1. Termómetros de Expansão

Os materiais sofrem alterações quando são expostos a diferentes temperaturas, e é com base nesta propriedade física que se baseia o funcionamento de um termómetro de expansão. Efetivamente, com base no coeficiente de dilatação térmica material, é possível ter a noção da temperatura

deste, uma vez que o volume varia com a temperatura. Isto, considerando que o material se apresenta no estado sólido ou líquido. Caso o material em causa se apresente no estado gasoso, a informação sobre a temperatura é concluída com base na pressão [14].

No caso de o corpo estar em estado sólido, a variação do comprimento numa dada direção é dada por (2.1).

$$\Delta \ell = \alpha \ell \Delta T \quad (2.1)$$

onde $\Delta \ell$ representa a variação de comprimento do corpo, ℓ o comprimento segundo uma direção, ΔT a variação de temperatura do corpo e α o coeficiente de dilatação linear.

Caso o corpo se apresente no estado líquido, a variação da temperatura, implicará uma variação do volume V do corpo dada por (2.2).

$$V = V_0(1 + \beta T) \quad (2.2)$$

onde V representa o volume do material no estado líquido à temperatura ambiente; V_0 o volume do corpo à temperatura de 0°C ; T a temperatura do corpo; e β o coeficiente de dilatação volumétrica.

Por sua vez, caso o corpo se apresente no estado gasoso, a variação de temperatura implicará uma variação na pressão. Desde que o gás se encontre num recinto fechado, a variação de pressão é dada por (2.3).

$$PV = nRT \quad (2.3)$$

em que P representa a pressão actual, V o volume, n o número de moles, R a constante universal de gases perfeitos e T a temperatura.

2.4.3.2. Termorresistências

As termorresistências têm como base de funcionamento o princípio de variação da resistência elétrica de um metal, que é afetado com a variação da sua temperatura. Este tipo de sensor é denominado RTD (Resistance Temperature Detector) e o seu material constituinte mais comum é a platina. Apesar de admitirem uma boa precisão, serem simples e fiáveis, estes sensores são frágeis e sofrem de auto-aquecimento uma vez que a resistência é percorrida por uma corrente, que, por efeito Joule, conduz à libertação de calor[14].

O comportamento da resistência, em função da temperatura, é dado por (2.4), embora seja apenas uma aproximação, é suficiente para muitas aplicações [14].

$$R = R_0(1 + \gamma_1 T) \quad (2.4)$$

Na equação (2.4), R representa a resistência do elemento, R_0 a resistência do elemento à temperatura de referência, γ_1 o primeiro coeficiente de temperatura e T a temperatura.

Como referido, apesar de as termorresistências apresentarem boa precisão, simplicidade e fiabilidade, estes são bastante frágeis e necessitam de um circuito eletrónico (Figura 2.6), para que seja possível converter o valor resistivo em tensão ou corrente. De todos os circuitos, a ponte de Wheatstone, é o mais utilizado [14].

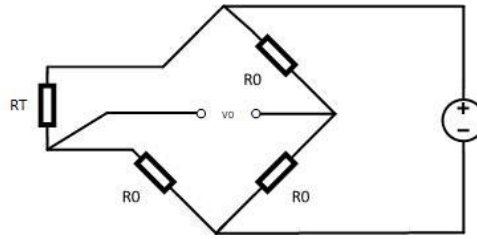


Figura 2.6 - Montagem de uma termorresistencia a três fios.

2.4.3.3. Termístores

À semelhança das termorresistências, os termístores baseiam-se no princípio de variação da resistência elétrica com a variação da temperatura. Todavia, os termístores são semicondutores e possuem maior sensibilidade quando comparados com as termorresistências [14].

Os termístores podem ser de tipo NTC ou PTC. Sendo que o tipo NTC corresponde a uma variação inversa da resistência elétrica com a temperatura, quer isto dizer que a resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura. O tipo PTC corresponde a uma relação direta entre a variação da resistência elétrica e a variação da temperatura [14].

A resistência de um termístor, de forma simplificada, é dada por (2.5).

$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.5)$$

onde R representa a resistência do termístor, R_0 a resistência do termístor a uma temperatura de referência, β a característica do termístor, T a temperatura e T_0 a temperatura de referência.

2.4.3.4. Termopares

Os termopares são sensores de temperatura que combinam dois materiais condutores ou semicondutores. O seu funcionamento engloba o efeito de Seebeck, o efeito de Peltier e o efeito de Thomson [14].

O efeito de Seebeck justifica a origem de uma força eletromotriz, proveniente da junção de dois materiais diferentes, a partir da qual se pode traduzir numa temperatura. O efeito de Peltier e o efeito de Thomson traduzem a geração ou absorção de calor, por parte do termopar, induzindo a medida em erro, pelo que é pretendido que estes efeitos sejam mínimos [14].

Devido à grande quantidade de combinações de materiais, que podem constituir um termopar, foram consideradas combinações padrão, designadas pelas letras B, E, G, J, K, N, R, S e T. Cada combinação apresenta uma gama de temperatura e precisão diferente das diversas [14].

2.4.3.5. Circuitos Integrados

Os materiais semicondutores sofrem alterações nas suas características quando expostos a diferentes temperaturas. Normalmente esta característica é indesejada, no entanto pode ser aproveitada de forma a mensurar a temperatura.[14].

Quando uma junção P-N é polarizada com uma tensão constante, o valor da corrente depende da temperatura seguindo a expressão (2.6). Desta forma é possível mensurar a temperatura com base na corrente [14].

$$I = I_S \left(e^{\frac{qV}{2KT}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

onde V representa a tensão aplicada à junção, I a corrente na junção, I_S a corrente inversa de saturação, q a carga de um eletrão, K a constante de Boltzmann e T a temperatura.

É de notar que os transístores de junção bipolar, que são constituídos por duas junções P-N, têm um comportamento semelhante [14].

Este tipo de sensor possui sensibilidade alta, boa linearidade e grande precisão. No entanto, não devem ser expostos a altas temperaturas, o que limita a sua gama de temperaturas.

2.4.3.6. Pirómetro

Um pirómetro permite mesurar a temperatura de um objeto ou superfície, à distância, através da radiação emitida pelo objeto ou superfície. Tal ocorre através do foco de energia que é radiada pelo objeto, sobre um sensor de temperatura [14].

O uso de pirómetro deve-se maioritariamente à impossibilidade de haver contacto entre a superfície e o sensor, em casos como:

- Objetos ou superfícies a temperaturas muito elevadas, havendo a possibilidade de danificação do sensor;
- Objetos ou superfícies com propriedades corrosivas;
- Objetos ou superfícies em movimento.

Identificam-se três tipos de pirómetros:

- Pirómetro Ótico, destinado a medir temperaturas entre 700 °C e 4000 °C;
- Pirómetro de infravermelhos, destinado a medir temperaturas entre -20 °C e 1000 °C;
- Sensor por deteção de fotões, destinado a medir temperaturas entre -50°C e 2000 °C.

2.4.3.7. Termómetros de Quartzo

Os termómetros de Quartzo convertem a frequência de oscilação do quartzo, quando exposto a uma tensão alternada sinusoidal, em temperatura. Isto porque a frequência de oscilação depende da temperatura [14].

Nestes termómetros é possível encontrar uma gama de temperaturas compreendida entre 80 °C e 250 °C, uma sensibilidade alta e boa linearidade.

2.4.4 Controlador PID

Por forma a alcançar uma temperatura estável no sistema, é necessário projetar um controlador para o sistema. No caso de um sistema *Sous vide*, com o objetivo de alcançar e permanecer a uma temperatura desejada, foi necessário considerar um módulo controlador que ajuste continuamente

a potência do elemento aquecedor. Módulo este segue um algoritmo PID, uma vez que oferece uma solução simples e eficiente para problemas de controle [15].

No que toca aos controladores aplicados na indústria, predominam os controladores PID devido à sua simplicidade, funcionalidade e aplicabilidade [15].

Um controlador PID opera com base em três componentes, proporcional (P), integral (I) e derivativa (D), e o seu comportamento pode ser descrito pela expressão (2.7) [16].

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.7)$$

onde u é a variável de controlo, e é o erro de controlo, K o ganho proporcional, T_i o tempo integral e T_d o tempo derivativo. Sendo que o erro, e , é dado pela diferença do valor de referência com o valor presente do processo. Através do diagrama de bloco da Figura 2.7 é possível interpretar visualmente o funcionamento deste tipo de controlador.

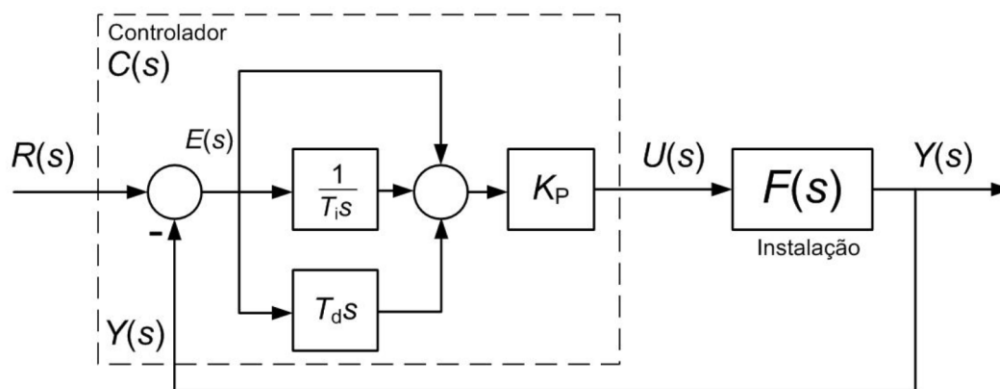


Figura 2.7 - Esquema de blocos de um controlador PID [17].

A componente proporcional depende apenas do erro no instante em causa, uma vez que é o resultado do produto entre o ganho e o erro nesse instante. Esta dita que ação de controlo é proporcional ao erro.

A componente integral avalia o histórico do erro por forma a eliminar o erro num estado estacionário [17]. O objetivo será a ação resultar numa saída do sistema coincidente com a referência, aquando num estado estacionário.

A componente derivativa prevê a tendência do erro antes que este ocorra, através da sua variação. Desta forma é possível contrapor a sobre-elevação e melhorar a estabilidade, em malha fechada.[17].

2.5 Módulo de Controle

2.5.1 Optoacoplador

Por forma a garantir isolamento elétrico entre o circuito de controlo e o circuito de potência, recorre-se a um optoacoplador. O objetivo é, caso um dos circuitos sofra alguma anomalia, o outro circuito, à partida, não será afetado por esta.

Um optoacoplador permite transferir um sinal entre os dois terminais, sendo estes isolados um do outro, uma vez que a transmissão de informação é realizada através de um sinal infravermelho [18].

Desta forma, é possível:

- Implementar circuitos alimentados por diferentes fontes de alimentação.
- Realizar o isolamento entre sinais de baixa potência e sinais de alta potência.
- Eliminar a propagação de ruído elétrico.
- Obter um circuito de tamanho mais reduzido.

Neste projeto é utilizado o MOC3063M produzido pela FAIRCHILD, cujo esquemático é apresentado na Figura 2.8. O sinal deste componente é emitido por um IRED e recebido por um TRIAC, permitindo assim, que um sinal proveniente do microcontrolador, consiga controlar uma carga alimentada por corrente alternada.

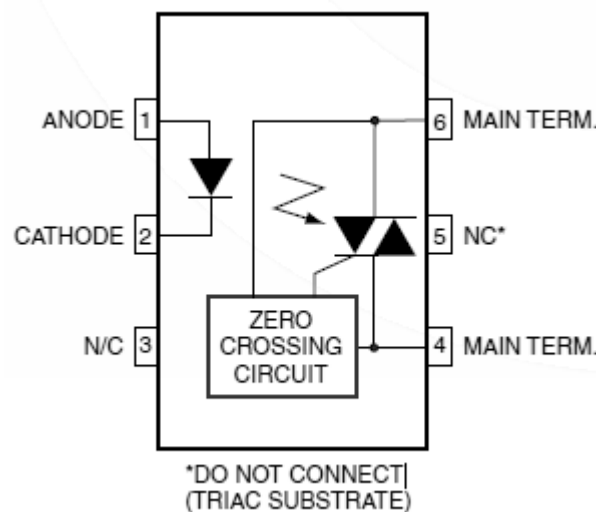


Figura 2.8 - Esquemático do MOC3063 [19].

Este optoacoplador é composto por um circuito de deteção de cruzamento da tensão por zero, permitindo reduzir o stress e interferência eletromagnética [20], no entanto, a ativação do fototriac apenas se realiza após o cruzamento da tensão por zero, o que limita a frequência máxima de ativação a 100 Hz.

2.5.2 TRIAC

O TRIAC é um componente que possibilita o controlo de sistemas AC, quer isto dizer que funciona como um interruptor para sistemas que conduzem corrente em ambos os sentidos. O TRIAC é composto por três terminais, MT1, MT2 e Porta: os terminais MT1 e MT2 estão conectados ao sistema AC; o terminal Porta é responsável pelo acionamento do componente. Este pode ser representado por dois tirístores com o terminal Porta partilhado, como se pode verificar na Figura 2.9 [21]. Note-se que o terminal Porta está representado por G.

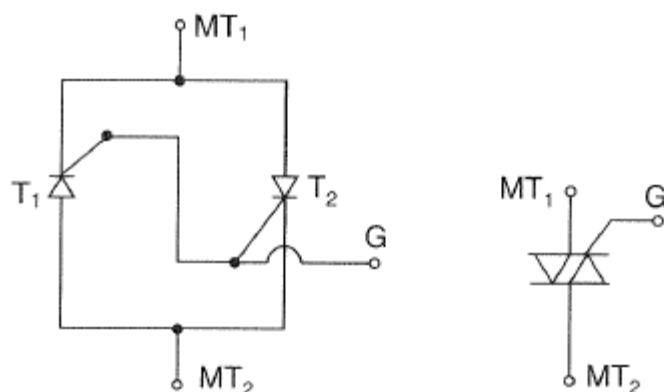


Figura 2.9 - Esquemático e símbolo do TRIAC [21].

O TRIAC conduz corrente alternada entre os terminais MT1 e MT2 quando aplicada uma tensão, positiva ou negativa no terminal Porta, superior à sua tensão limiar. É de notar que um TRIAC pode ser desencadeado em quatro quadrantes (Figura 2.10), o que permite alguma flexibilidade num circuito [22].

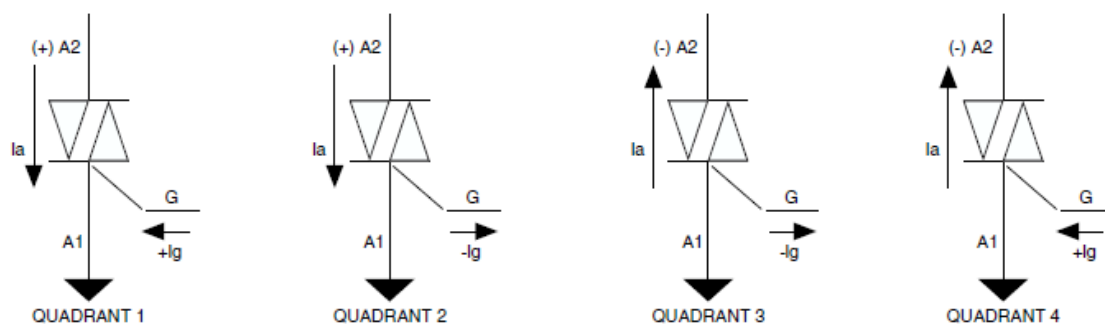


Figura 2.10 - Quadrantes de desencadeamento de um TRIAC [22].

ESTUDO TEÓRICO

Este capítulo introduz a teoria sobre o transiente da condução de calor no sistema, bem como uma introdução sobre a sintonização de um controlador PID, tendo sido necessária a modelação do sistema e do controlador.

3.1 Transiente da Condução de Calor

A temperatura de um corpo varia no tempo e espaço. Expresso em coordenadas retangulares, obtém-se algo como $T(x, y, z, t)$, onde (x, y, z) representa um ponto no espaço e t representa o tempo. Em termos de transferência de calor, pode-se optar por diferentes análises.

Considere-se um sistema aglomerado. Um sistema aglomerado, é um sistema em que a temperatura varia com o tempo, mas é uniforme no espaço. A temperatura de um corpo aglomerado de massa m , volume V , área de superfície A , densidade ρ e capacidade térmica c_p , inicialmente a uma temperatura T , que está exposto a uma convecção no momento $t = 0$, para um meio de temperatura T_m , com coeficiente de transferência de calor h , é expressa pela equação (3.1) [23].

$$\frac{T(t) - T_m}{T_i - T_m} = e^{-bt} \quad (3.1)$$

onde b é uma grandeza positiva cuja dimensão é $(\text{tempo})^{-1}$, segue a expressão (3.2) [23].

$$b = \frac{hA_s}{\rho c_p V} \quad (3.2)$$

Com isto é possível determinar temperatura $T(t)$ do corpo no momento t , ou o tempo t necessário para alcançar essa temperatura.

Para que a aplicação da análise de sistemas aglomerados seja válida, é necessário calcular o comprimento característico do corpo L_c [23], expresso pela equação (3.3).

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (3.3)$$

Com este, é possível calcular o número de Biot (Bi), expresso pela equação (3.4) [23].

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (3.4)$$

onde k é a condutividade térmica e o número de Biot é a razão entre a resistência interna do corpo à condução de calor e a sua resistência externa à convecção de calor. Desta forma, um valor baixo para o número de Biot traduz em gradientes pequenos de temperatura e pouca resistência à condução de temperatura.

Uma análise de sistemas aglomerados é exata quando $Bi = 0$ e aceitável quando $Bi \leq 0,1$, uma vez que a temperatura de contorno em relação à temperatura do núcleo, do corpo, pode ter uma diferença dentro de 5% [23].

Quando se trata de um valor superior a 0,1 para o número de Biot, o gradiente de temperatura no corpo torna-se significativo, requerendo uma análise diferente [23].

A análise de condução transiente unidimensional adimensionalizado aproxima a transferência de calor a um só plano, como no caso de uma parede onde se considera que a altura e a largura são significativamente superiores à espessura e há simetria térmica no plano central. Passando por $x = 0$, levando à distribuição simétrica no plano central [23].

Com isto, a temperatura adimensional, para uma parede plana segue a equação (3.5).

$$\theta = \frac{T(x,t) - T_m}{T_i - T_m} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \cos\left(\frac{\lambda_1 x}{L}\right) \quad (3.5)$$

A temperatura adimensional de um cilindro segue a equação (3.6).

$$\theta = \frac{T(r,t) - T_m}{T_i - T_m} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} J_0\left(\frac{\lambda_1 r}{r_0}\right) \quad (3.6)$$

A temperatura adimensional de uma esfera segue a equação (3.7).

$$\theta = \frac{T(r,t) - T_m}{T_i - T_m} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \frac{\sin\left(\frac{\lambda_1 r}{r_0}\right)}{\frac{\lambda_1 r}{r_0}} \quad (3.7)$$

onde as constantes A_1 e λ_1 são funções do número de Biot, J_0 é a função de Bessel do primeiro tipo de ordem zero τ e o tempo adimensional (Número de Fourier) dado por:

$$\tau = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (3.8)$$

onde α é a difusividade térmica do material e dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.9)$$

De notar que as expressões da temperatura adimensional apresentadas acima apresentam um erro menor que 2% para um valor de τ superior a 0,2, como costuma ser de interesse geral [23].

No caso da determinação da temperatura do centro do corpo. Para uma parede plana, esta é dada por (3.10).

$$\theta = \frac{T_0 - T_m}{T_i - T_m} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad (3.10)$$

Para um cilindro, a temperatura no centro do corpo é dada por (3.11).

$$\theta = \frac{T_0 - T_m}{T_i - T_m} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad (3.11)$$

Para uma esfera, a temperatura no centro é dada por (3.12).

$$\theta = \frac{T_0 - T_m}{T_i - T_m} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad (3.12)$$

Estas expressões são limitadas a condições específicas, nomeadamente inicialmente o corpo tem que estar a uma temperatura uniforme, a temperatura do meio em torno do corpo e o coeficiente de transferência de calor por convecção devem ser constantes e uniformes, sem geração de calor no corpo [23].

3.2 Modelação do Sistema

O sistema estudado nesta dissertação necessita de ser modelado matematicamente para que se obtenha uma base de estudo do seu comportamento. Esta modelação pode envolver um grau de dificuldade elevado, uma vez que existe a necessidade de ter em conta todos os fatores que têm impacto no sistema, como também o modelo matemático destes. Com isto, considera-se que o sistema de aquecimento e aquisição, numa versão simplificada, pode ser modelado de acordo com o que está representado no diagrama de blocos da Figura 3.1. Quando o aquecedor é ativado durante um período de tempo, este provoca um ascendimento da temperatura da água, e a transição de temperatura é medida por um sensor de temperatura.

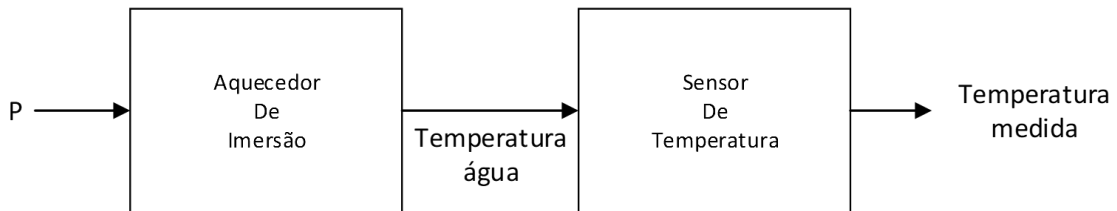


Figura 3.1 - Modelo do sistema de aquecimento.

Este sistema pode ser descrito considerando um modelo elétrico equivalente em que a resistência e capacidades térmicas são modeladas por uma resistência e uma capacidade elétrica, respetivamente. Para simplificar a análise considera-se que estes parâmetros são invariantes no tempo.

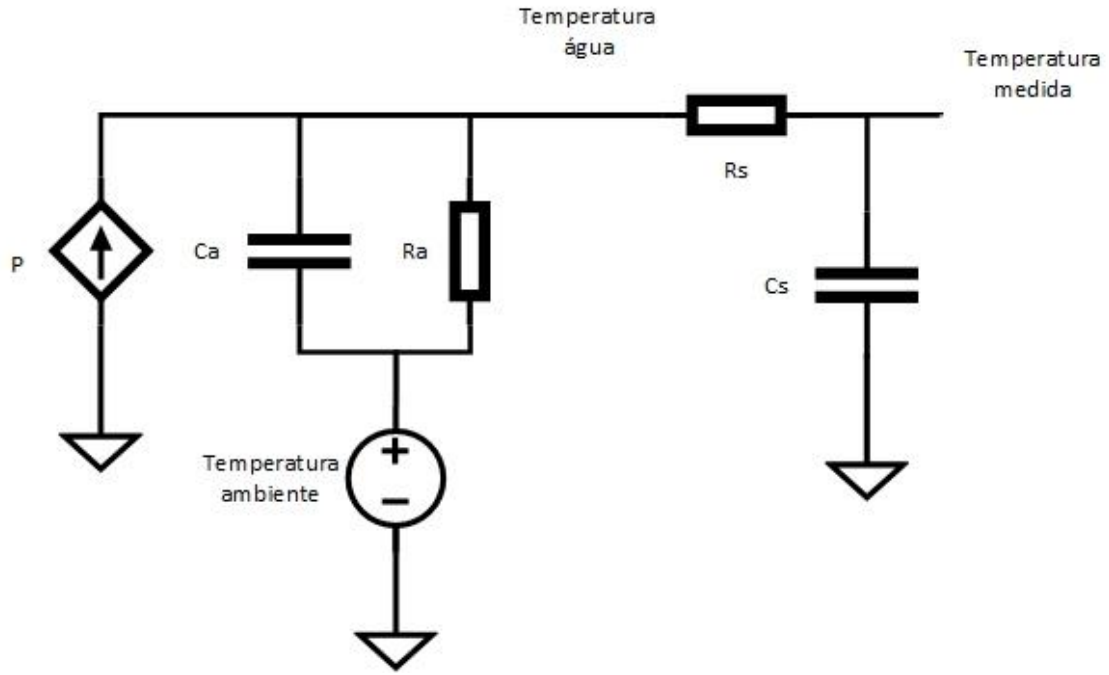


Figura 3.2 - Modelo elétrico equivalente do sistema de aquecimento.

Sendo que P corresponde à quantidade de tempo em que o aquecedor está ativo durante a janela de trabalho, C_a corresponde à capacidade térmica da água, R_a corresponde à resistência térmica da água para o meio ambiente, R_s corresponde à resistência térmica entre o sensor e a água e C_s à capacidade térmica do sensor.

Analisando o circuito da Figura 3.2, verifica-se que a função transferência do sistema é dada por:

$$H(s) = \frac{R_a}{sR_a C_a + 1} \frac{1}{1 + sR_s C_s} \quad (3.13)$$

Analisando o circuito anterior, obtendo a função transferência $\frac{T_{medida}}{P}$ e depois aplicando a transformada inversa de Laplace obtém-se a equação (3.14) que descreve a evolução da temperatura da água em função do tempo.

$$T_{água} = P R_a \left(1 - e^{-\frac{t}{R_a C_a}} \right) + T_{ambiente} \quad (3.14)$$

Enquanto a temperatura medida pelo o sensor tem um comportamento semelhante ao descrito pela equação (3.15).

$$T_{medida} = T_{água} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_s C_s}} \right) \quad (3.15)$$

Ao sujeitarmos o sistema a um dado valor constante de P , e obtermos a sua resposta a um degrau, é possível calcular a constante de tempo do sistema. Para um valor P de 75 ms, obteve-se a resposta do sistema que está apresentada na Figura 3.3.

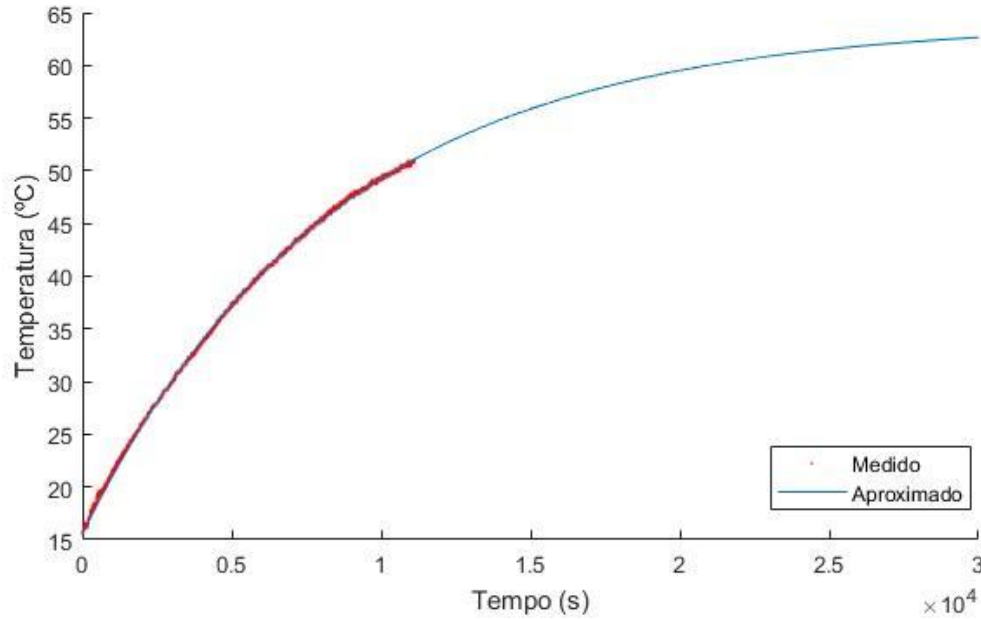


Figura 3.3 - Resposta do sistema a um degrau (P=10%).

Com esta resposta, determinou-se através de ajustes de curvas a equação que faz uma aproximação ao gráfico, sendo que tem de tomar a forma da equação (3.16), pois trata-se de uma exemplificação da equação que descreve a evolução da temperatura da água.

$$y(t) = a(1 - e^{bt}) + c \quad (3.16)$$

Para a simplificar o ajuste de curvas, o valor assumido para a constante c , que representa a temperatura ambiente da água, é o correspondente à primeira medição de temperatura, idêntico ao da medição no instante $t = 0$, instante este em que o aquecedor não se encontra acionado. Do mesmo modo, os valores para a e b , para os quais foi possível obter uma curva muito semelhante são de 48.4683 e $-0,0001$ respetivamente. Onde a curva resultante está apresentada na Figura 3.3 com a cor azul. Como $a = PR_a$ e $b = -\frac{1}{R_a C_a}$, é possível calcular as constantes R_a e C_a , que tomam os valores aproximados de $0,6462 \text{ CmW}^{-1}$ e $13029,6661 \text{ JC}^{-1}$, respetivamente. Com o valor da constante de tempo do sistema $\tau_{\text{sistema}} = R_a C_a$ calculada, calculou-se a constante de tempo do sensor de temperatura $\tau_{\text{sensor}} = R_s C_s$.

O cálculo da constante de tempo do sensor foi realizado através do registo da evolução da temperatura. Para tal, o sensor foi mergulhado em água a uma temperatura aproximada de 45°C e foi obtido o gráfico da Figura 3.4.

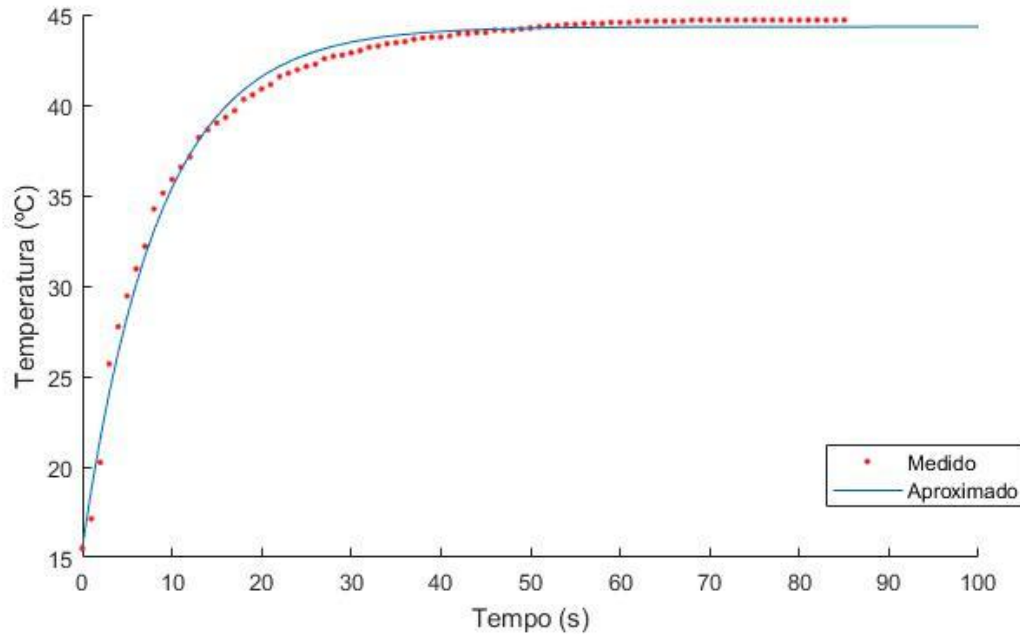


Figura 3.4 - Resposta do sensor a um degrau.

Como realizado na secção anterior, aplicou-se novamente um ajuste às curvas e foi possível determinar a constante de tempo do sensor, que assume o valor de 8,5110 segundos. A curva pode ser observada a vermelho na Figura 3.4.

Como o sistema tem uma constante de tempo muito lenta, cerca de 8420 segundos, à partida o comportamento do sensor não irá influenciar negativamente no controlo do sistema.

Uma vez calculadas as constantes de tempo, a função transferência total do sistema corresponde à equação (3.17).

$$H(s) = \frac{0,6462}{s8420,3436 + 1} \frac{1}{s8.5110 + 1} \quad (3.17)$$

Através da função de transferência é possível verificar que o sistema não tem zeros, mas tem dois pólos. De notar, que a função transferência obtida é uma aproximação em que se despreza a variação da densidade, variação da capacidade calorífica, nível de água e perdas de calor que têm um impacto significativo no comportamento do sistema.

3.3 Modelo Discreto do Controlador PID

Uma vez que o controlador PID é implementado num microcontrolador, este terá um comportamento discreto no tempo, pois a variável de entrada é amostrada. Desta forma, o tempo de amostragem terá impacto no funcionamento do sistema e quanto menor for, melhor será o comportamento previsível e o seu desempenho.

O tempo de amostragem será condicionado pelo o tempo em que o sensor de temperatura consegue converter uma medida. Surge assim um conflito de escolha entre o tempo de conversão de uma medida e a resolução das medições de temperatura. Como a constante de tempo do sistema de aquecimento é muito alta, é dado mais importância à resolução que ao tempo de conversão, pois

uma constante de tempo elevada representa pouca variância no tempo e assim o comportamento do sistema entre duas amostras, será do tipo linear.

Como referido anteriormente, o controlador PID está no domínio discreto e com isto é necessário converter (2.7) para o domínio discreto, onde as componentes integrativa e derivativa assumem a forma de (3.18) e (3.19) respetivamente. De notar que a aproximação da componente integrativa é realizada segundo o método de Tustin e que a aproximação da componente derivativa é realizada segundo o método de Euler backward [17].

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx \frac{T_a}{2} (e(n) + e(n-1)) \quad (3.18)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(n) - e(n-1)}{T_a} \quad (3.19)$$

Onde n é a variável temporal discreta, obtida de $t = n * T_a$.

Assim, a expressão do controlador, no domínio do tempo discreto segue a expressão (3.20).

$$u(n) = K_p e(n) + K_i T_a \sum_{k=0}^n e(k) + K_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T_a} \quad (3.20)$$

Onde o parâmetro k_i segue a expressão (3.21) e o parâmetro k_d segue a expressão (3.22).

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (3.21)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (3.22)$$

Aplicando a transformada Z à componente integrativa (3.18), resulta a expressão (3.23).

$$I(z) = \frac{T_a z + 1}{2 z - 1} \quad (3.23)$$

Aplicando a transformada Z à componente derivativa (3.19), resulta a expressão (3.24).

$$D(z) = \frac{1 - z^{-1}}{T_a} \quad (3.24)$$

Com base em (3.23) e (3.24), a função transferência do controlador no domínio Z é dada por:

$$C(z) = K_p + K_i \frac{T_a z + 1}{2 z - 1} + \frac{K_d}{T_a} (1 - z^{-1}) \quad (3.25)$$

Para facilitar a interpretação da expressão (3.25), esta foi desenvolvida, obtendo-se as expressões (3.26) e (3.27).

$$C(z) = \frac{\left(K_p + \frac{K_i T_a}{2} + \frac{k_d}{T_a}\right) - \left(K_p + \frac{K_i T_a}{2} - 2 * \frac{K_d}{T_a}\right) z^{-1} + K_d \frac{z^{-2}}{T_a}}{1 - z^{-1}} \quad (3.26)$$

$$C(z) = \frac{z^2 \left(K_p + \frac{K_i T_a}{2} + \frac{K_d}{T_a}\right) - z \left(K_p + \frac{K_i T_a}{2} - 2 \frac{K_d}{T_a}\right) + \frac{K_d}{T_a}}{z(z - 1)} \quad (3.27)$$

Através de (3.27) verifica-se que o controlador irá impor dois pólos, um em 0 e o outro em 1, e dois zeros que dependem dos valores dos seus parâmetros.

3.4 Sintonização do Controlador

O sistema em malha fechada com o controlador irá ter uma função transferência como indica (3.28).

$$F(z) = \frac{C(z)H(z)}{1 + C(z)H(z)} \quad (3.28)$$

Aplicando a transformada de z à expressão do sistema, tendo em conta um período de amostragem de 750 ms, resulta na expressão (3.29).

$$H(z) = \frac{0,000002074z + 0,000002014}{z^2 - 1,9160z + 0,9156} \quad (3.29)$$

Com base na expressão (3.29), foi possível criar o diagrama de localização de raízes, que se apresenta na Figura 3.5.

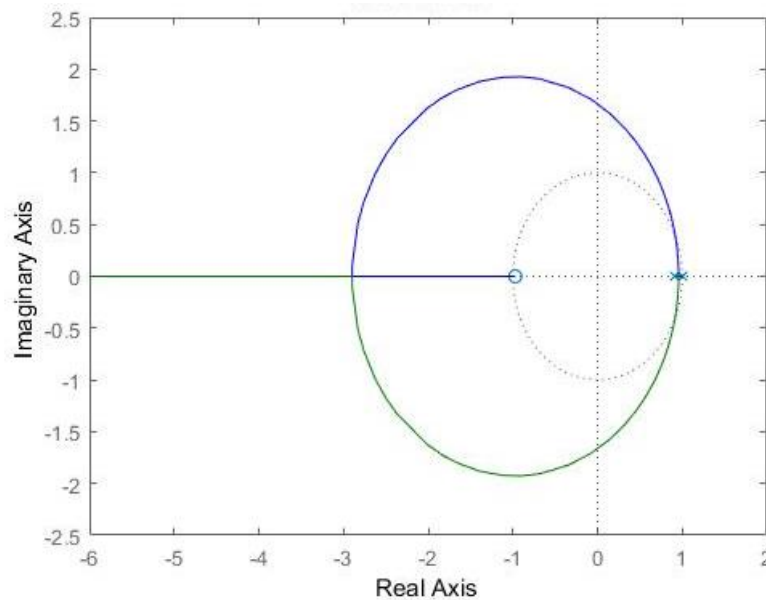


Figura 3.5 - Diagrama de lugares das raízes do sistema.

Com isto afinou-se o controlador PID de forma a não obter sobrelevação, obtendo um tempo de estabelecimento menor que 1500 segundos. Uma possível hipótese corresponde à localização dos zeros em 0,9999 e 0,9182. Em que o diagrama de lugares das raízes do sistema com controlo PID apresenta-se na Figura 3.6.

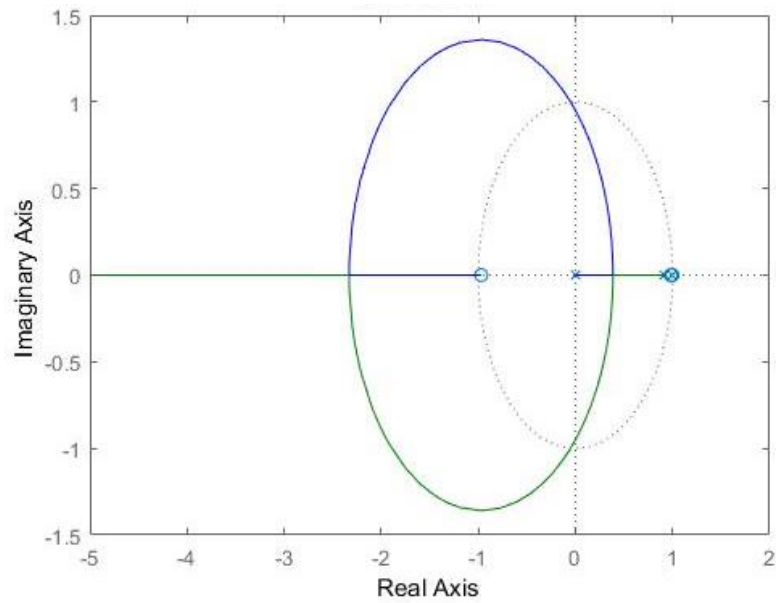


Figura 3.6 – Diagrama de lugares das raízes do sistema com controle PID.

A resposta do sistema com controle PID a um degrau igual de amplitude 45 apresenta-se na Figura 3.7.

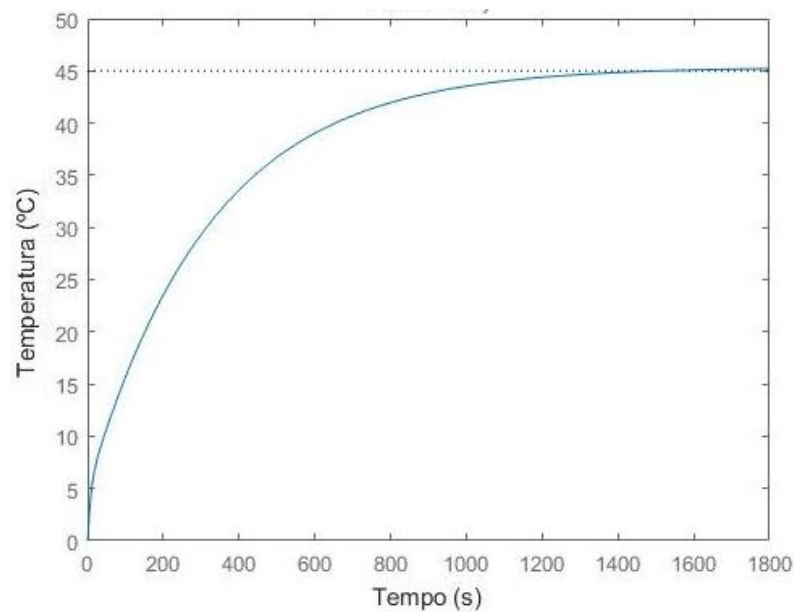


Figura 3.7 - Resposta teórica do sistema com controle PID a um degrau de amplitude 45.

Através da Figura 3.7 verifica-se que o sistema não apresenta sobrelevação e tem um tempo de estabelecimento de 1400 segundos, cumprindo os requisitos definidos para o controlador.

Uma vez obtido os valores dos zeros do controlador PID é possível calcular os valores dos parâmetros k_p , k_i , k_d deste controlador, que tomam os valores 54, 0,0044 e 455 respetivamente.

SISTEMA PROPOSTO

Os componentes principais do sistema proposto neste capítulo trabalham com alimentações bem distintas: o aquecedor de imersão é alimentado pela rede elétrica, ou seja, 230 V e corrente alternada; o microcontrolador é alimentado com 5 V e corrente contínua. Assim, surge a necessidade de isolar estes componentes de forma a evitar danos. Para tal, o sistema foi dividido em dois módulos: o módulo de controlo e o módulo de processamento.

O módulo de controlo visa controlar o elemento aquecedor, sendo o módulo responsável pela ativação e desativação deste. O módulo de processamento processa o sinal do sensor de temperatura, podendo retornar um sinal de ativação ou desativação para o módulo de controlo. Além disso, o módulo de processamento é responsável pela descodificação da interação do utilizador com o sistema, ou seja, é o módulo responsável por atender aos ajustes pretendidos pelo o utilizador para sistema.

4.1 Módulo de Processamento

O módulo de processamento do sistema é fundamental, sendo responsável por diversas funções, como a leitura do sensor de temperatura, deteção e descodificação da interação do utilizador, temporizador, controlador PID e construção do sinal de controlo que é enviado para o módulo de controlo. Estas funções são descritas neste capítulo identificando-se as suas funções e a sua implementação a alto nível.

O módulo de processamento é composto por quatro botões, um LCD, um microcontrolador, e dois sensores de temperatura. As relações entre cada elemento estão apresentadas na Figura 4.1, sendo que a interface de utilizador engloba os botões e o LCD, sendo o controlador PID, o temporizador, a leitura dos botões e do sensor é executado no microcontrolador.

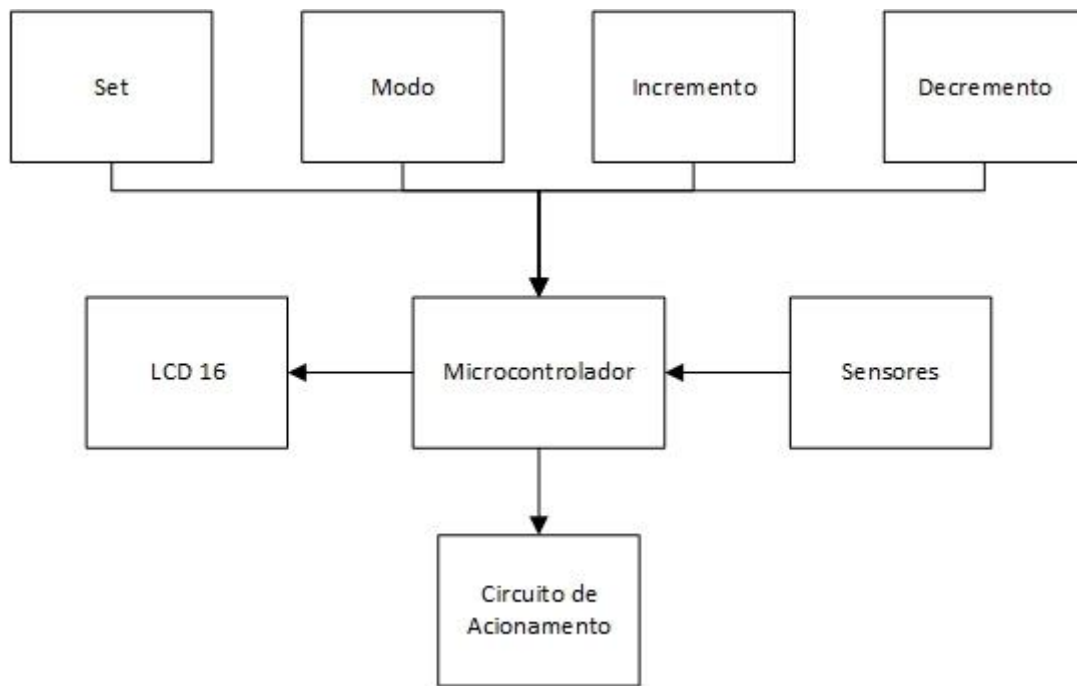


Figura 4.1 - Diagrama de blocos do módulo de processamento.

4.1.1 Sensor de temperatura

A aquisição de dados é importante para o projeto, por se tratar de um sistema de controlo de temperatura. O sensor de temperatura a ser usado tem um impacto significativo uma vez que o sinal proveniente deste tem um papel importante para a estabilidade do sistema. Tendo isto em consideração, o projeto requer exatidão e precisão na obtenção de um resultado confiável e dentro do expectável para este tipo de sistema.

Neste projeto é dada especial atenção ao sensor DS18B20, uma vez que apresenta características que se encaixam no projeto: é de fácil acesso, económico e possível de se adquirir com o formato impermeável, ou seja, apto à imersão em líquidos.

O projeto está apto a utilizar outros tipos de sensores de temperatura, caso se opte por um sensor analógico, este requer um andar de amplificação de sinal adequado. Com isto, a precisão e exatidão são afetadas pela qualidade da sonda de temperatura, módulo de amplificação de sinal e pelo o ADC. Além disto, é necessária uma calibração do sensor de temperatura, o que requer pelo menos um sensor de temperatura com um grau de exatidão superior ao pretendido para o sensor de temperatura a calibrar.

4.1.1.1. Sensor DS18B20

O DS18B20 é um sensor de temperatura digital que permite a medição de temperatura com uma resolução ajustável de 9 a 12 bits, permitindo um ajuste da precisão do sensor, sendo o tempo máximo de conversão, em função da resolução, dado pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Tempo de conversão máximo em função da resolução do sensor DS18B20 [24].

Resolução (Bits)	Tempo de conversão máximo (ms)
9	93.75
10	187.5
11	375
12	750

A comunicação com o sensor é realizada através do protocolo One-Wire, desenvolvido pela “Dallas Semiconductor Corp”, que requer apenas uma linha de transmissão de dados.

Este sensor apresenta uma exatidão de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pode realizar medições de temperatura entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uma vez que se trata de um sensor digital, não requer hardware adicional de conversão, pois todo o tratamento de sinal é realizado pelo o sensor. Em contrapartida, não é possível melhorar a qualidade das medições.

Cada sensor DS18B20 é portador de um código série de 64 bits, permitindo o uso de diversos sensores DS18B20 na mesma linha de dados.

A alimentação deste sensor pode ser realizada por dois métodos, usando-se uma alimentação externa ou em modo parasita. Este último método usa a energia da linha de dados quando está num nível lógico alto, e é armazenada num condensador parasita, permitindo colmatar a falta de energia quando a linha de dados está num nível logico baixo.

Contudo, quando o sensor está a processar uma conversão, pode requerer uma corrente de até 1,5 mA. Esta corrente pode causar uma queda inaceitável de tensão e é uma corrente superior à que o condensador parasita consegue fornecer. De forma a garantir energia suficiente no modo parasita, considere-se um transistor Mosfet.

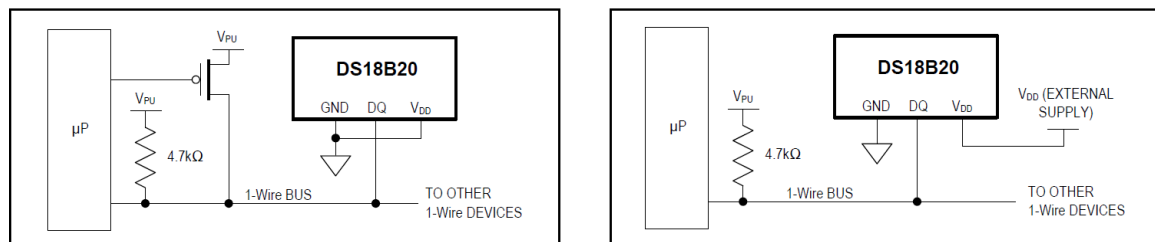


Figura 4.2 - Métodos de alimentação do sensor DS18B20 [24].

Na Figura 4.2 é possível verificar os dois métodos de alimentação do sensor DS18B20, anteriormente referidos. De notar que a resistência *pull-up* de $4,7\text{ k}\Omega$ é um requisito do protocolo One Wire.

Este sensor está disponível em diversas configurações físicas como 8 Pin-SO (150 mils), 8-Pin-μSOP e TO-92. Também se encontra disponível num formato encapsulado, eliminando a necessidade de impermeabilizar o sensor.

4.1.2 Interface de Utilizador

O sistema em causa é ajustável e como tal, para que seja possível fazer o ajuste de forma manual, foi implementado uma interface de utilizador. A Interface apresenta quatro botões e um LCD para que se tenha a noção das alterações impostas.

Os botões permitem mudar entre os modos, configuração ou ativo. O modo configuração permite configurar a temperatura pretendida e um temporizador, sendo que o temporizador apenas é ativado ou desativado pelo utilizador através do botão *Set* e em modo ativo.

Caso o sistema se encontre no modo ativo, apenas o botão *Modo* e *Set* serão interpretados, os outros não irão ter impacto algum. Caso o programa esteja em modo de configuração, todos os botões têm a sua função.

O botão *Set* permite a alterar a variável sujeita a um incremento ou decremento: seleciona ou a variável *Tempo*, responsável pelo o tempo do temporizador; ou a variável *Temperatura alvo*, responsável pela a temperatura desejada. Os botões *Incremento* e *Decremento*, como o nome indica, permitem o incremento e decremento do valor da variável selecionada. No caso do tempo, o incremento ou decremento é de 5 minutos, no caso da temperatura alvo, é de 1 °C.

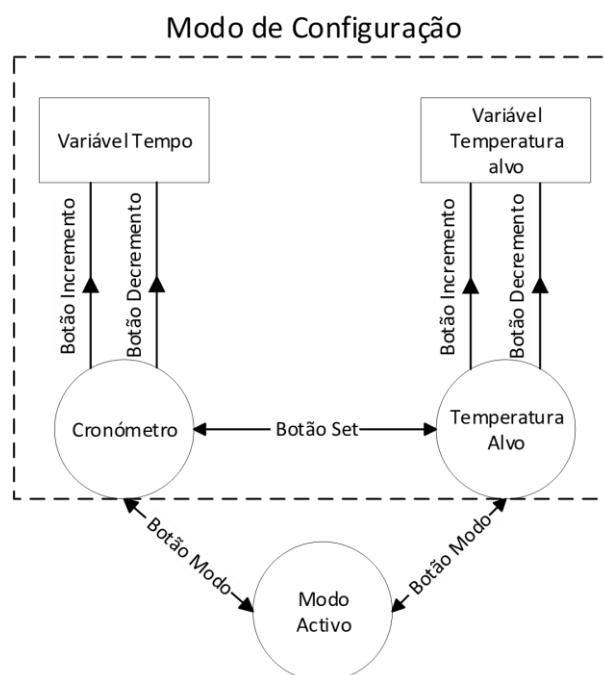


Figura 4.3 - Fluxograma do Menu.

Como referido anteriormente, no projeto o LCD permite ao utilizador acompanhar visualmente as alterações efetuadas se estiver no modo de configuração; ou acompanhar o comportamento do sistema se estiver no modo ativo.

O LCD utilizado é como um ecrã de caracteres, pelo que se rege aos caracteres do código ASCII e alguns caracteres especiais simples; também há a possibilidade de se criar caracteres, sendo um pouco limitado devido à quantidade limitada de pixéis que apresenta. O LCD é composto por 2

linhas e 16 colunas, sendo que cada célula apresenta uma matriz de 7 linhas e 5 colunas; apresenta um fundo azul, caracteres brancos e é possível configurar o contraste entre os caracteres e o fundo.

A sua configuração é realizada pelos 16 pinos, estado as respetivas funções e descrições apresentadas na Tabela 4.2. Note-se que é possível enviar instruções em 4 bits ou 8 bits, no entanto este projeto utiliza o modo de 4 bits, uma vez que permite poupar pinos do microcontrolador; por outro lado, é necessário realizar a operação de escrita duas vezes.

Tabela 4.2 - Conexões LCD.

Pino	Função	Descrição
1	VSS	Massa
2	VDD	Alimentação de 5 V
3	VEE	Tensão de ajuste de contraste
4	RS	1 – Envio de dados 0 – Envio de instrução
5	R/W	1 – Leitura do LCD 2 – Escrita no LCD
6	E	Habilita o LCD
7	D0	Barramento de dados
8	D1	
9	D2	
10	D3	
11	D4	
12	D5	
13	D6	
14	D7	
15	LED +	Alimentação da luz de fundo
16	LED -	Massa da luz de fundo

Podem-se utilizar monitores diferentes ou de resolução diferente, no entanto este foi escolhido por ser de fácil acesso, tamanho reduzido e simples implementação.

4.1.3 Controlador PID

O controlador PID baseia-se numa biblioteca criado por Brett Beauregard, disponível gratuitamente, e bastante conhecida pela comunidade Arduino.

A biblioteca disponibiliza funções como:

- PID()
- Compute()
- SetMode()

- SetOutputLimits
- SetTunings()
- SetSampleTime()
- SetControllerDirection()
- GetKp()
- GetKi()
- GetKd()
- GetMode()
- GetDirection()

Onde, PID() cria um controlador PID interligado às variáveis:

- Entrada
- Saída
- Valor desejado
- Cada parâmetro Kp, Ki e Kd
- Direção

A função Compute() contém o algoritmo PID, e quando executada, calcula um valor de saída. A função SetMode() permite especificar se o controlador está em modo AUTOMATIC ou MANUAL, ligado ou desligado respetivamente. A função SetOutputLimits(), permite definir o intervalo de valores que a variável de saída irá convergir. A função SetTunings() permite atualizar os valores dos parâmetros Kp, Ki e Kd do controlador. A função SetSampleTime() permite definir o intervalo de amostragem do controlador. A função SetControllerDirection() permite definir a direção do controlador em DIRECT ou REVERSE, pois caso o valor de entrada seja superior ao valor desejado, pode-se pretender diminuir o valor da variável de saída, no caso de um aquecedor ou aumentar o valor da variável de saída, no caso de refrigerador. Finalmente, esta biblioteca permite consultar o valor da variável de cada parâmetro do controlador, do modo do controlador e da direção do controlador, com as funções GetKp(), GetKi(), GetKd(), GetMode(), GetDirection(), respetivamente.

4.1.4 PWM

O sistema em causa tem uma constante de tempo relativamente lenta, a variável de saída demora a reagir aquando da alteração na variável de entrada. Tendo isto em conta, implementou-se uma modulação por pulso de longo período. A frequência desta modulação não deve ser superior à da frequência da rede por causa do funcionamento do circuito de cruzamento por zero do optoacoplador, que tende a evitar o stress realizado no aquecedor e a interferência eletromagnética.

A implementação desta modulação ocorre a nível digital, onde antes do início de cada ciclo, é calculado o momento em que a onda deve sempre transitar para o valor lógico 0. Sendo que se assume que inicia sobre a forma do valor lógico 1. Uma vez calculado este momento, é verificado a uma dada frequência se este momento foi ou não ultrapassado. Caso se verifique, o microcontrolador comuta o valor lógico da onda.

Para facilitar o controlo do sistema, o período da onda é ditado pelo o tempo de conversão do sensor de temperatura. Desta forma, a cada medição de temperatura é processado um novo valor de tempo ativo para a onda.

4.2 Módulo de controlo

O módulo de controlo interliga o módulo de processamento e o aquecedor, ou seja, é o responsável pela ativação ou desativação do aquecedor com base no sinal proveniente do módulo de processamento. Uma das necessidades deste módulo surge do facto do sinal proveniente do microcontrolador ser de corrente contínua e o aquecedor ser alimentado a corrente alternada, além disto, o sinal proveniente do microcontrolador toma um valor aproximado de 5 V e o aquecedor funciona a 230 V.

Neste módulo, devido ao optoacoplador, presencia-se isolamento elétrico entre os dois circuitos, porque como mencionado anteriormente, a transmissão de informação é realizada através de infravermelhos. Com isto, é possível ativar e desativar um sistema de corrente alternada com uma tensão elevada, mas devido ao facto de o aquecedor funcionar a uma corrente superior à suportada pelo o optoacoplador, é necessário a implementação de um TRIAC que habilite a fluência deste nível de corrente.

O circuito optado para implementar este módulo é um dos circuitos sugeridos em [19] e pode ser verificado na Figura 4.4.

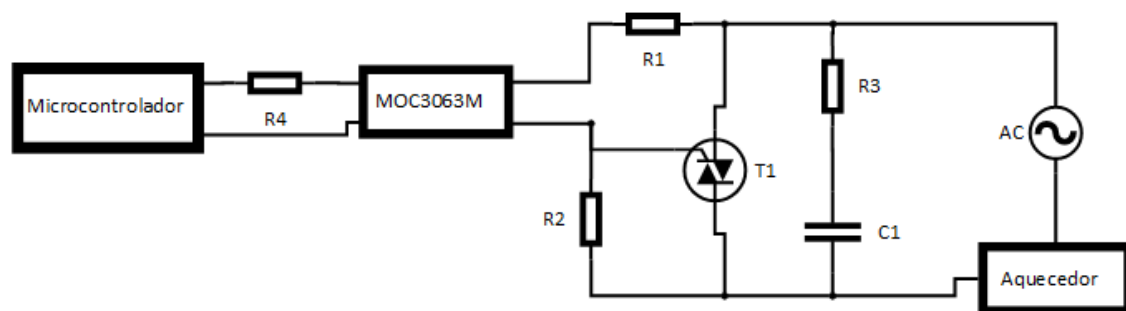


Figura 4.4 - Circuito de controlo.

O circuito é composto por um optoacoplador MOC3063M, que ativa o seu optotriac interno caso o seu LED interno emita um sinal. Para tal é necessário alimentar o LED com uma tensão de 1,3 V e uma corrente de 5 mA. Como referido anteriormente, existe a necessidade de usar um TRIAC auxiliar como meio condutor de energia para o aquecedor, sendo ativado o TRIAC interno do optoacoplador, este irá ativar o TRIAC auxiliar que acaba por alimentar o aquecedor. Na Figura 4.5 é possível verificar esta relação de forma mais clara.

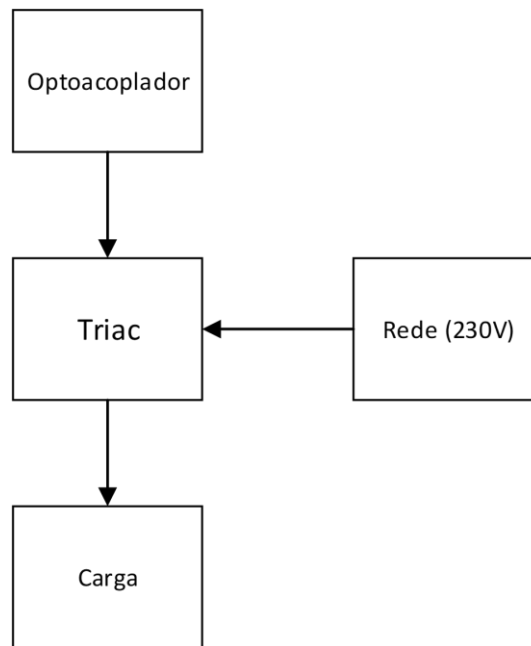


Figura 4.5 - Diagrama de blocos do módulo de controle .

O circuito da Figura 4.4 tem implementado um circuito snubber, composto pelo o condensador C1 e a resistência R3. Este tipo de circuito é responsável pela limitação da variação de tensão no tempo $\left(\frac{dV}{dT}\right)$, reduzindo o stress nas componentes de potência durante a transição de estados e as perdas de energia através da dissipação de temperatura [25].

4.3 Custo de Produção

Uma vez definidos todos os componentes a implementar, foi realizado uma pesquisa referente ao custo unitário de cada um, tendo como resultado a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Lista de componentes e respectivos preços.

Componente	Quantidade	Preço Unitário (€)	Total (€)
Eurojava Aquecedor de Imersão 1500 W	1	15,00 €	15,00 €
PCB módulo de Controlo	1	0,18 €	0,18 €
PCB módulo de Processamento	1	1,89 €	1,89 €
DS18B20	2	8,10 €	16,20 €
LCD 16x2	1	4,65 €	4,65 €
MOC3063M	1	0,74 €	0,74 €
Teensy 3.2	1	17,45 €	17,45 €
Jack 3,5 mm macho	1	0,25 €	0,25 €
Jack 3,5 mm fêmeo	1	0,58 €	0,58 €
Botão de pressão	4	0,55 €	2,20 €
Bloco de 3 terminais c/Parafuso	1	0,05 €	0,05 €
Bloco de 2 terminais c/Parafuso 2,54 mm	1	0,05 €	0,05 €
Barra de pinos Fêmeo de 14 pinos 2,54 mm	4	0,30 €	1,20 €
Barra de pinos Fêmeo de 8 pinos 2,54 mm	1	0,18 €	0,18 €
Barra de pinos Macho de 16 pinos 2,54 mm	1	0,24 €	0,24 €
Barra de pinos Macho de 3 pinos 2,54 mm	3	0,04 €	0,12 €
BTB12-600TW3	1	1,32 €	1,32 €
Socket 3x2 7,62mm	1	0,07 €	0,07 €
Socket 14x2 15,24mm	1	0,21 €	0,21 €
Potenciômetro 10K Ω	1	0,42 €	0,42 €
Resistência 10 k Ω	4	0,01 €	0,04 €
Resistência 360 Ω	3	0,01 €	0,03 €
Resistência 39 Ω	1	0,01 €	0,01 €
Resistência 4,7 k Ω	1	0,01 €	0,01 €
Condensador 0,01 μ F 2000 V	1	1,40 €	1,40 €
Condensador 100 nF 50 V	2	0,01 €	0,02 €
Caixa plástica 74x89x41 mm	1	2,64 €	2,64 €
Espaçador plástico 10 mm M3	8	0,02 €	0,16 €
Parafuso plástico M3	8	0,02 €	0,16 €
Barra de pinos Fêmeo 2 pinos 2,54 mm	1	0,05 €	0,05 €
Ligador de 3 ligações Wago	3	0,42 €	1,26 €
Dissipador de calor c/encapsulamento TO220	1	1,04 €	1,04 €
Cabo elétrico multifilar redondo	2 metros	0,98 €	1,96 €
Tomada schuko 16 A 250 V	1	2,87 €	2,87 €
Custo Total			74,65 €

IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Este capítulo relata os processos realizados na elaboração do projeto. Primeiramente é dado foco ao módulo de processamento e posteriormente ao módulo de controlo. No final é relatado a construção do sistema em si, envolvendo estes módulos.

5.1 Módulo de processamento

5.1.1 Sensor

A implementação do sensor de temperatura DS18B20 envolve uma implementação tanto a nível de *software* como de hardware. Sendo que a implementação em hardware trata a adaptação do sensor ao microcontrolador e a implementação em *software* retrata a comunicação entre estes.

5.1.1.1. Leitura

Como referido anteriormente, a leitura dos sensores é realizada com auxílio das bibliotecas *OneWire* e *DallasTemperature*. Enquanto a primeira responsável pela comunicação entre o microcontrolador e os sensores, a segunda biblioteca permite detetar e interagir com esses sensores. Desta forma, o pino do microcontrolador, ao qual a linha de dados do sensor de temperatura, está conectada, é a referência para o objeto *OneWire*, e posteriormente o objeto *DallasTemperature* tem como referência o objeto *OneWire*.

Na função de inicialização `setup()`, inicializa-se o objeto, define-se a resolução pretendida e garante-se que a conversão de temperatura é assíncrona, por forma a realizar diferentes tarefas ao mesmo tempo,

```
Sensores.begin();  
Sensores.setResolution(12);
```

```
Sensores.waitForConversion(false);
Sensores.requestTemperatures();
```

A leitura de temperatura é realizada na função `leituraTemperaturas()`. Uma vez que a conversão de temperatura é assíncrona, surge também a necessidade de verificar o resultado da conversão após o intervalo de tempo requerido para a mesma, que depende da resolução imposta. Após a leitura do resultado da conversão, é realizado de imediato uma nova conversão e é atribuído o valor do sensor da zona do aquecedor à variável de entrada do controlador PID. De notar que a consulta de resultados é realizada por índice, uma vez que cada sensor é portador de um código identificativo. A temperatura do primeiro índice é a correspondente ao sensor da zona do aquecedor e a leitura do segundo índice é a correspondente ao sensor do outro extremo da panela.

```
void leituraTemperaturas() {

    TempoActual = millis();

    if (TempoActual - TempoConversaoInicial >= 750) {
        DS18B20Valor = Sensores.getTempCByIndex(0);
        DS18B20Valor2 = Sensores.getTempCByIndex(1);
        Sensores.requestTemperatures();
        EntradaPID = DS18B20Valor2;
        TempoConversaoInicial = millis();
    }
}
```

5.1.1.2. Circuito de implementação

A implementação física do sensor DS18B20 segue o circuito da Figura 4.2, em que a alimentação do sensor provém do microcontrolador. Este Circuito tem uma resistência *pull-up* de 4,7 k Ω , que está implementada numa PCB.

5.1.2 Interface de utilizador

5.1.2.1. Botões

O uso de botões para auxiliar a interface com o utilizador requer a implementação de resistências, que evitam uma tensão flutuante na entrada do pino do microcontrolador. Este tipo de montagem é denominado por *pull-up* ou *pull-down*, caso seja pretendida uma tensão de referência aproximada do valor da alimentação, ou uma tensão de referência de valor 0 V, respetivamente. Estas montagens são muito semelhantes e a diferença entre elas apenas afeta a leitura da transição, pois trabalham com estados lógicos opostos.

Este projeto adota a montagem *pull-up*, assumindo-se: o estado lógico 1 por omissão, ou seja, o estado em que o botão não está pressionado; e o estado lógico 0 como estado alternativo. O esquema elétrico para cada botão está representado na Figura 5.1.

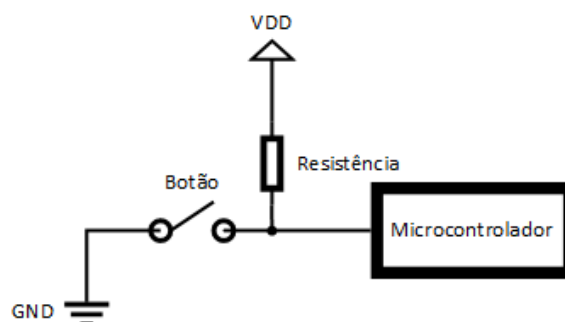


Figura 5.1 - Montagem *Pull-up*.

O valor das resistências foi dimensionado com o objetivo de consumir pouca energia, tal que o valor usado é de 10 k Ω , que deriva num consumo de 500 μ A.

Apesar de se ter considerado este tipo de montagem, foi detetada a ocorrência do fenómeno *bounce*, que introduz instabilidade na leitura da transição de estados. Assim, foi implementada uma solução através de *software* para evitar este fenómeno; essa solução é analisada na secção 5.1.6.2.

5.1.2.2. LCD

A implementação física do LCD segue as ligações apresentadas na Figura 5.2, e a sua implementação digital foi efetuada com recurso à biblioteca LiquidCrystal, desenvolvida pela Arduino.

Uma vez que diferentes LCD's necessitam de diferentes valores de tensão para obter o mesmo nível de contraste entre o carácter e o fundo, é necessário que o valor de tensão no pino 3 do LCD (VEE) seja ajustável. Para tal, foi utilizado um potenciómetro, que permite facilmente variar esta tensão.

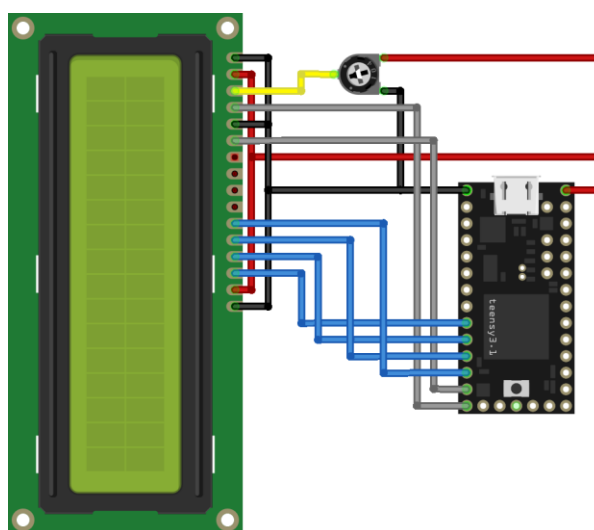


Figura 5.2 - Conexão entre o microcontrolador e LCD.

Como referido na secção 4.1.2, a implementação do LCD não utiliza todos os pinos do LCD por conveniência, daí serem apresentados 4 pinos sem qualquer conexão na Figura 5.2

Uma vez que é necessário apresentar no LCD o que realmente pode ser útil para o utilizador, e tendo em conta a limitação de caracteres deste dispositivo, optou-se por apresentar em modo ativo os valores referentes a:

- Temperatura medida pelo o sensor DS18B20 da zona do aquecedor (valor apresentado na zona superior e à esquerda do LCD).
- Temperatura alvo (valor apresentado na zona superior e intermédia do LCD).
- Temperatura medida pelo o sensor DS18B20 da zona do alimento (valor apresentado na zona inferior e à esquerda do LCD).
- Valor do temporizador (valor apresentado na zona inferior e intermédia do LCD).
- O valor de saída do controlador PID (valor apresentado na zona inferior e à direita do LCD).

Como se verifica na Figura 5.3.



Figura 5.3 - LCD em modo ativo.

Caso o programa se apresente em modo de configuração, o LCD apresenta os valores:

- Temperatura Pretendida (Zona superior do LCD).
- Tempo do temporizador (Zona inferior do LCD).

Como se pode verificar na Figura 5.4.



Figura 5.4 - LCD em modo de configuração.

É de notar que o traço “-” apresentado no LCD é o símbolo que indica o parâmetro que pode ser afetado por incremento ou decremento.

5.1.3 Controlador PID

A biblioteca usada é de fácil implementação, uma vez que, no caso mais simples, basta declarar o objeto PID, indicando a variável de entrada, a variável de saída, a variável do valor de desejado, os parâmetros do controlador, Kp, Ki e Kd, e a direção do controlador. Após a declaração deste

objeto, é necessário atualizar a variável de entrada, definir o valor alvo desejado, o modo de operação, automático ou manual, e por fim, sempre que é desejado que o controlador processe um valor de saída, basta chamar a função `compute`. De notar que no caso deste projeto a função `compute` é chamada sempre que o período da onda PWM termina. O resultado processado pelo o controlador está definido num intervalo entre 0 e 750, valores definidos com o auxílio da função `SetOutputLimits`, e com base neste resultado é calculado o instante de tempo em que a onda PWM deve desativar.

A resposta do controlador PID é dita pelos os seus parâmetros, K_p , K_i e K_d , que possuem diferentes valores para diferentes sistemas ou condições do ambiente. Dito isto, é necessário obter os valores satisfatórios para o sistema em causa ter um comportamento como se pretende. A determinação dos valores destes parâmetros foi realizada através de um método de Ziegler-Nichols, em concreto, pelo o método da sensibilidade última. Este método heurístico permite alcançar a estabilidade definindo os valores dos parâmetros K_i , K_d a zero e aumentando o valor do parâmetro K_p até atingir o valor crítico K_u . No caso deste sistema, o valor para o parâmetro K_p que se considerou mais adequado é de 800. Na Figura 5.5 é possível verificar a oscilação provocada por este controlador proporcional, uma vez que os parâmetros K_i e K_d tomam um valor nulo.

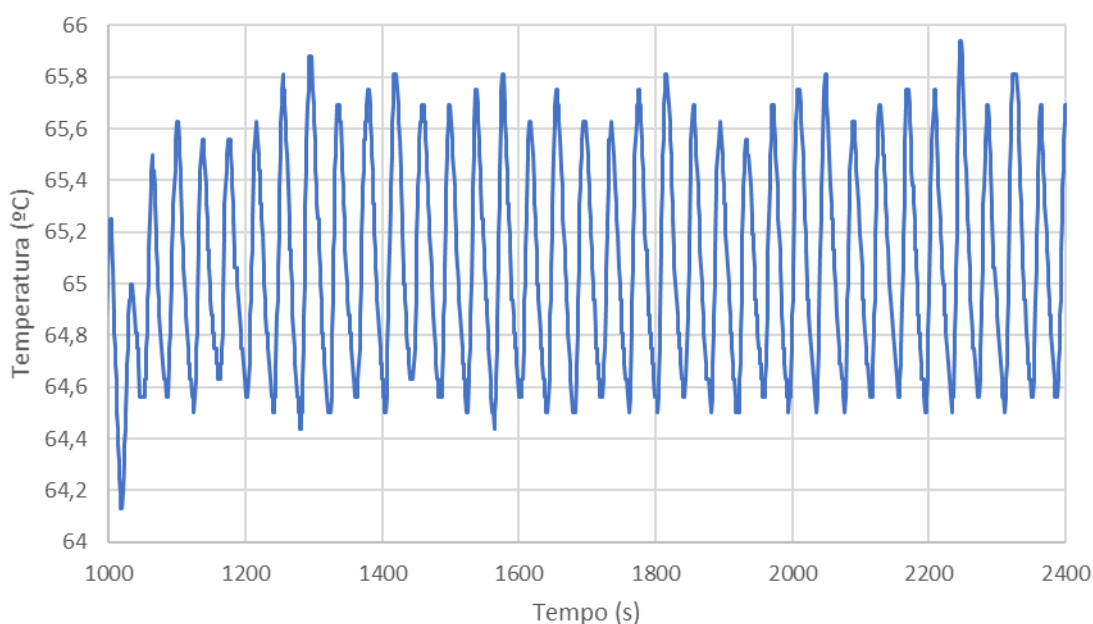


Figura 5.5 - Resultado do controlador com o método da sensibilidade ultima de Ziegler-Nichols.

Com base na informação da Figura 5.5, extrai-se o período crítico T_u , correspondente ao período da oscilação. Uma vez obtidos estes valores críticos, os parâmetros do controlador são calculados com base na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parametros do controlador através do método de Ziegler-Nichols.

Tipo	K_p	T_i	T_d
Controlador P	$0,5K_u$	-	-
Controlador PI	$0,45K_u$	$\frac{T_u}{1,2}$	-
Controlador PID	$0,6K_u$	$\frac{T_u}{2,0}$	$\frac{T_u}{8,0}$

No caso deste sistema, o parâmetro K_p toma o valor de 480, o parâmetro K_i toma o valor aproximado de 21 e o parâmetro K_d toma o valor aproximado de 2750.

5.1.4 Circuito Eletrônico do Módulo de Processamento

O circuito eletrônico do módulo de processamento envolve todos os circuitos necessários para a implementação dos elementos anteriormente relatados. Acrescentou-se também um circuito de adaptação de um sensor RTD, na eventualidade de se querer substituir o sensor de temperatura por um sensor RTD.

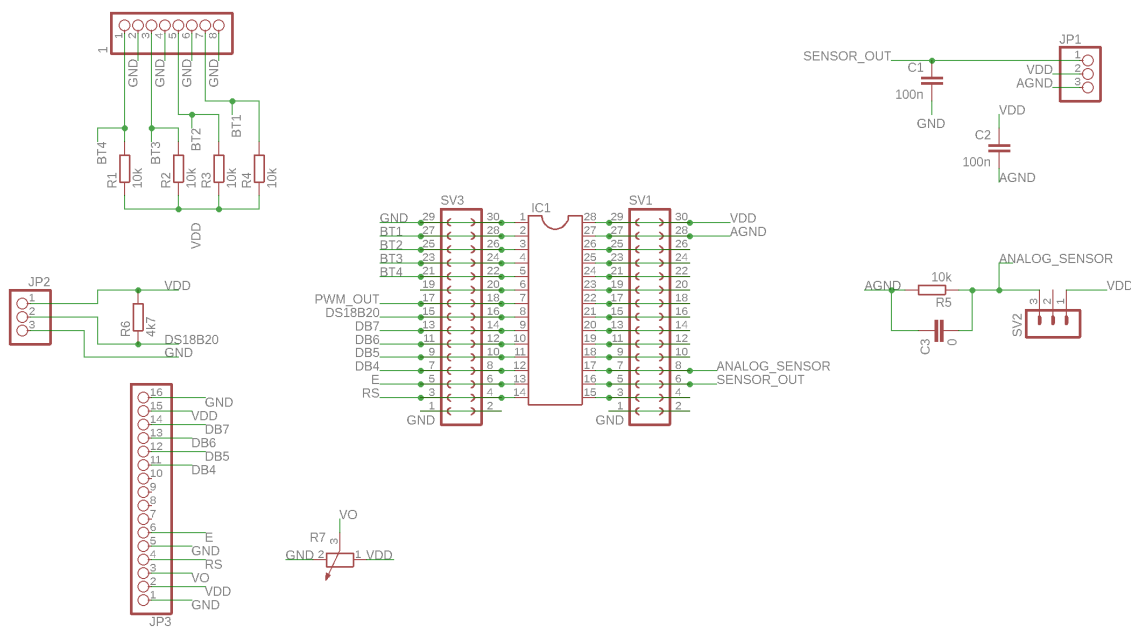


Figura 5.6 - Circuito eléctrico do módulo de processamento.

A implementação do sensor DS18B20 requer um conector de 3 pinos, nomeadamente, alimentação, massa e saída de sinal; e uma resistência de 4,7 k Ω , entre a saída de sinal e a alimentação, como se verifica no canto superior esquerdo da Figura 5.6 Como referido anteriormente, a implementação dos botões requer resistências *pull-up*, de forma a estabilizar a tensão na entrada do microcontrolador, bem como um pino de ligação à massa, por cada botão, como se verificar no canto superior esquerdo da Figura 5.6. A ligação do LCD foi descrita, em detalhe, anteriormente e pode-se comprovar no canto inferior esquerdo da Figura 5.6. Foi implementado um circuito de forma a ser possível a utilização de um sensor RTD, composto por uma resistência e um condensador em

paralelo. A resistência serve de auxílio para calcular, aproximadamente, o valor resistivo correspondente ao RTD, uma vez que está em série com este e assim forma um divisor de tensão. O condensador serve para filtrar o sinal de saída, reduzindo o ruído deste.

Introduziram-se dois conjuntos de pinos, de duas colunas e 15 linhas, de modo a facilitar o acesso à maioria dos pinos do microcontrolador, permitindo a implementação de novas funcionalidades ou análise destes pinos.

5.1.5 PCB do Módulo de Processamento

A placa de circuito impresso, do módulo de processamento, foi desenvolvida no *software* Eagle, da Autodesk, na versão 9.0.1.

As placas de circuito impresso devem ser desenhadas tendo em conta diversos parâmetros, sendo que deve ser dada mais importância à espessura do cobre, largura da trilha, tipo de componentes, número de camadas e espaçamento entre trilhas.

Sendo que o circuito em causa é de baixa potência e seguindo um dimensionamento económico, definiu-se que todas as resistências são de 0,25 W, a espessura do cobre de 0,0347 mm, largura da trilha de 0,3048 mm e um espaçamento entre trilhas de 0,3048 mm.

Segundo [26], a corrente numa trilha é descrita pela expressão (5.1).

$$I = k\Delta T^{0,44} A^{0,725} \quad (5.1)$$

onde I corresponde à corrente em Amper, k a constante do tipo de camada, ΔT ao aumento de temperatura, em °C e A à secção, em mils².

Com base nos valores da espessura do cobre e da largura da trilha, a secção calculada é de 16,4400 mils², que corresponde a 0,0106 mm².

Com a secção calculada, considerando o valor 0,048, respetivo à camada exterior, à constante do tipo de camada, e considerando um aumento de temperatura de 10 °C, a corrente a fluir na trilha é aproximadamente 1,0064 A. Sendo que o circuito é de baixa potência, considera-se que as trilhas dificilmente alcançaram um aumento de temperatura de 10 °C.

Após definido o circuito a implementar (Figura 5.6), iniciou-se a construção do *layout*, onde foi definido o tamanho das trilhas, os seus trajetos, a dispersão dos componentes e a distância entre trilhas. Com isto, o layout resultante apresenta-se na Figura 5.7 e é de notar que se recorreu a duas camadas de cobre com objetivo de simplificar os trajetos das trilhas, sendo que a camada superior está associada à massa do circuito, permitindo simplificar as ligações e melhorar a dispersão térmica.

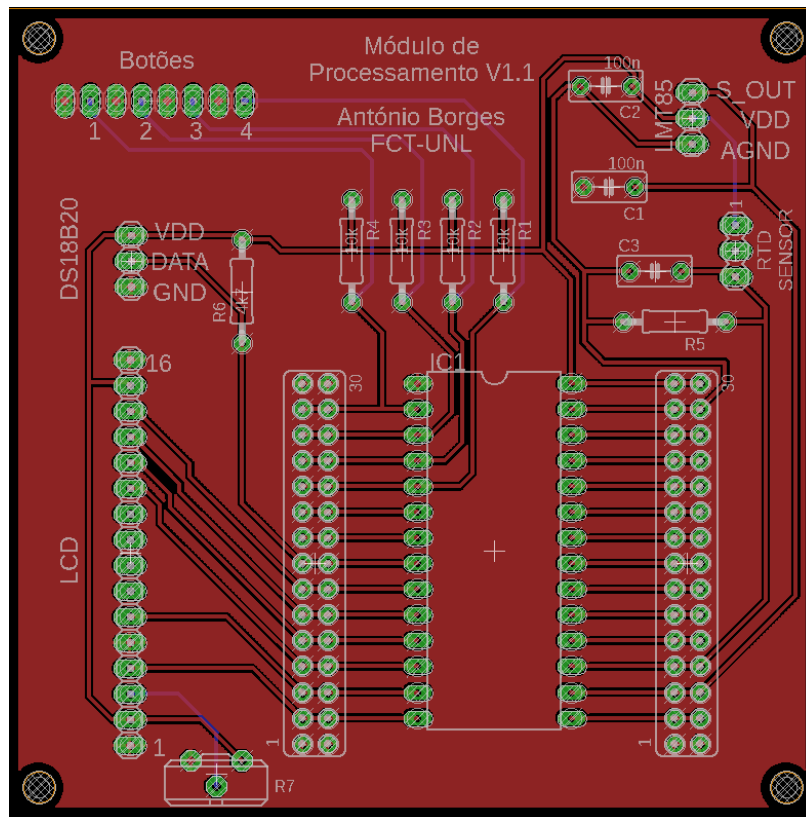


Figura 5.7 - Layout PCB do módulo de processamento.

5.1.6 Código

5.1.6.1. Temporizador

Para controlar o tempo em que o sistema deve estar ativo, foi implementado um temporizador digital, que quando alcança o fim, desliga o controlo do sistema. Este foi implementado com base numa interrupção temporal que ocorre a cada 1 segundo e decrementa o período em causa.

Este temporizador é de período ajustável pelo utilizador e pode ser ativo e desativo quando o utilizador pretender.

5.1.6.2. Debounce

A transição entre estados do botão não decorre de forma instantânea devido às condições das superfícies de contacto, originando oscilação entre estados lógicos durante alguns microssegundos. A este efeito dá-se o nome bounce. Para evitar ou reduzir este efeito foi necessário implementar-se algum controlo para a deteção de transição de estado ou introduzir um filtro passa-baixo, amortizando essa transição. Este projeto opta pela solução a nível de *software*, que consiste em implementar um tempo mínimo entre a deteção de alteração de estado, que deve ser sempre superior ao tempo de bounce do botão.

Após diversos testes, conclui-se que a detecção válida do estado ativo do botão, apenas deve ocorrer a cada 200 ms. Assim, quando a alteração de estado lógico é detetada pelo microcontrolador, este verifica se foi cumprido o tempo mínimo e valida, ou não, a transição de estado lógico.

5.1.6.3. PWM

A onda PWM implementada é composta por uma função que verifica e impõe a cada ciclo do microcontrolador se o aquecedor deve, ou não, permanecer ativo. O período de ativação do aquecedor é dado pela a conversão do resultado do controlador PID, estando o código está apresentado imediatamente abaixo.

```
void geradorPWM() {
    TempoActual = millis();

    if (TempoActual - JanelaTempoInicio > TempoJanela) {
        JanelaTempoInicio = millis();
    }

    if (TempoDeActividade <= 0) {
        TempoDeActividade = 0;
        digitalWrite(SaidaPWM, LOW);
        SaidaSistema = Inactivo;
    }
    else if (TempoDeActividade > TempoActual - JanelaTempoInicio) {
        digitalWrite(SaidaPWM, HIGH);
        SaidaSistema = Activo;
    }
    else if (TempoDeActividade < TempoActual - JanelaTempoInicio) {
        digitalWrite(SaidaPWM, LOW);
        SaidaSistema = Inactivo;
    }
}
```

5.1.6.4. Menu

Como indicado anteriormente, a interface de utilizador apresenta um botão denominado por menu, que permite a transição entre os modos do sistema, entre o modo ativo e o modo de configuração. Abaixo apresenta-se o código referente à deteção dessa transição e respetivos processos necessários.

```
void menu() {

    TempoInterrupcao = millis();

    if (TempoInterrupcao - UltimoTempoInterrupcao > TempoDebounce) {
        EstadoSistema = !EstadoSistema;
        if (EstadoSistema == Inactivo) {
            Temporizador.end();
            OndaPWM.end();
            controladorPID.SetMode(MANUAL);
        }
    }
}
```

```

    SaidaPID = 0;
}
else {
    Temporizador.begin(ciclo1segundo, 1000000);
    OndaPWM.begin(geradorPWM, 10000);
    controladorPID.SetMode(AUTOMATIC);
}
}
UltimoTempoInterrupcao = TempoInterrupcao;
}

```

Inicialmente deteta-se a validação da pressão no botão, que caso seja válida, procede-se à transição da variável responsável pelo modo do sistema. Caso o sistema se verifique inativo, procede-se à desativação do temporizador, do gerador de onda PWM e do controlador PID, e define-se o pino do microcontrolador responsável pela ativação/desativação do módulo de controlo com o valor lógico 0, garantindo-se que o aquecedor não permanece ativo.

Caso se verifique que ocorre uma transição para o estado ativo do sistema, procede-se à ativação das interrupções temporais correspondentes ao temporizador e gerador de onda PWM, e posteriormente realiza-se a ativação do controlador PID.

5.2 Módulo de controlo

5.2.1 Circuito Eletrónico do Módulo de Controlo

Como referido anteriormente, o circuito utilizado para controlar o elemento aquecedor (Figura 4.4), é sugerido em [19]. O circuito necessita do dimensionamento da resistência de ativação do optoacoplador, pois esta irá depender do valor de tensão correspondente ao sinal de ativação, que no caso do projeto, provém de um pino do microcontrolador. Segundo [19], as resistências R1 e R2 tomam o valor de $363\ \Omega$ e a resistência R3, complementar do circuito snubber, toma o valor de $39\ \Omega$, enquanto o condensador C1 toma o valor de $10\ \text{nF}$.

Um dos terminais da resistência está conectado ao microprocessador, que impõe $3,3\ \text{V}$, enquanto que o outro terminal está conectado ao optoacoplador. Tendo em conta que o LED incorporado no optoacoplador necessita no máximo $1,3\ \text{V}$ e no mínimo uma corrente de $5\ \text{mA}$, a resistência adequada deve tomar um valor aproximado de $400\ \Omega$.

5.2.2 PCB do Módulo de Controlo

Um dos primeiros processos no desenvolvimento de uma PCB passa pelo desenho de circuito elétrico considerando componentes reais, ou seja, componentes que apresentam características físicas específicas. A Figura 5.8 representa o esquemático implementado no *software* Eagle, onde os componentes MOC3063M e BTB12-600TW3 não fazem parte das bibliotecas, pelo o que se substituiu por componentes equivalentes.

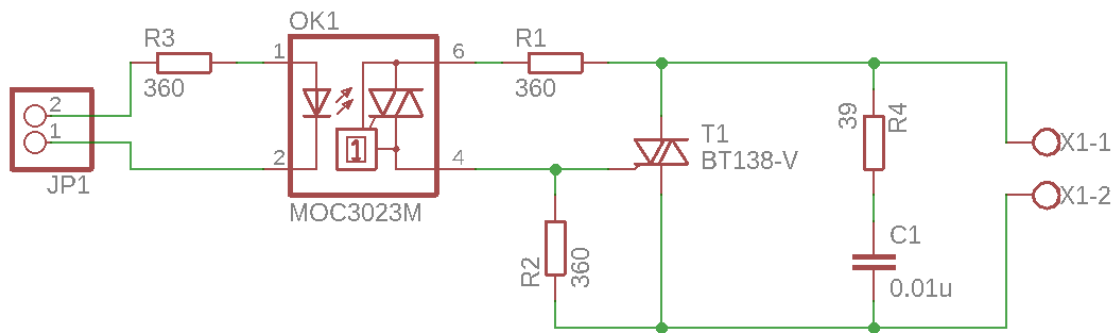


Figura 5.8 - Circuito do módulo de controlo no *software* Autodesk Eagle.

Uma vez que se trata de um circuito submetido a uma corrente e tensão média de cerca de 6,5 A e 230 V, surge a necessidade de dar especial atenção à secção da trilha e espaçamento entre trilhas, por serem valores significativos e por consequência obtêm um impacto significativo no comportamento da PCB.

Segundo [26], o espaçamento entre trilhas, quando se trata de uma tensão de 230 Vrms, deve ser no mínimo 0,8 mm. Tendo isto em conta, foi imposto um espaçamento, mínimo, entre trilhas no valor de 1 mm.

Como referido anteriormente, a corrente numa trilha, segundo [26], é dada por (5.1). Uma vez que se trata de uma carga com uma potência de 1500 W, e sendo ela resistiva, a corrente consumida pela a carga é cerca de 6,5 A. Assim dimensionou-se o tamanho da trilha para uma corrente de 8,5 A e um aumento de temperatura de 10 °C, tornando a placa apta à carga em causa ou até uma carga de maior potência. Com isto, a secção requerida segue a expressão (5.2).

$$A = \sqrt[0,7250]{\frac{I}{k\Delta T^{0,44}}} \quad (5.2)$$

Uma vez que se trata de uma camada exterior e de acordo com [26], k toma o valor 0,0480. Tendo isto, a secção calculada toma o valor aproximado de 311,9164 mils² equivalente a 0,2012 mm². Com isto e tendo em conta uma PCB com espessura de cobre de 0,0694 mm, a largura da trilha deve ser pelo menos 2,8991 mm.

De notar que se trata de um circuito de maior potência, pelo que a potência de cada resistência deve ser tida em conta e assegurado que é maior que a realmente está em causa.

Tendo em conta o circuito snubber, nota-se que este é sujeito a maior energia quando o TRIAC e o optoacoplador estão ao corte. Desprezando a resistência da carga, o circuito resultante é dado pela Figura 5.9.

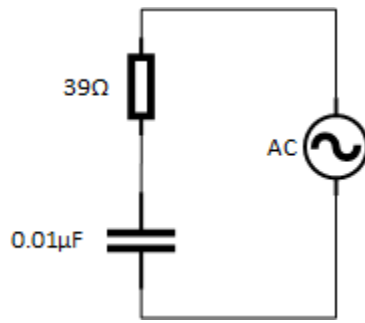


Figura 5.9 - Circuito de Controlo resultante ao corte.

Através da Figura 5.9 verifica-se que resulta uma série de um condensador e uma resistência. A reactância do condensador, considerando uma frequência de 50 Hz na fonte de alimentação, é aproximadamente 318310Ω , e a partir do seu valor, é possível calcular a impedância do circuito, que assume um valor de $318310,0024 \Omega$.

Uma vez calculada a impedância do circuito, a tensão máxima entre os terminais da resistência, através da regra do divisor de tensão, é aproximadamente 39.2071 V , como dita a expressão (5.3).

$$V_{R_{\max}} = \frac{39}{318310,0024} \times 320 \cong 39,2071 \text{ mV} \quad (5.3)$$

A potência máxima na resistência segue a expressão (5.4) e toma como resultado o valor de $39,4152 \text{ mW}$.

$$P_R = \frac{V_R^2}{R} \quad (5.4)$$

Considerando o fototriac do optoacoplador e o TRIAC no seu estado ativo, o circuito elétrico equivalente, em que se despreza a resistência da carga, é aproximado ao da Figura 5.10.

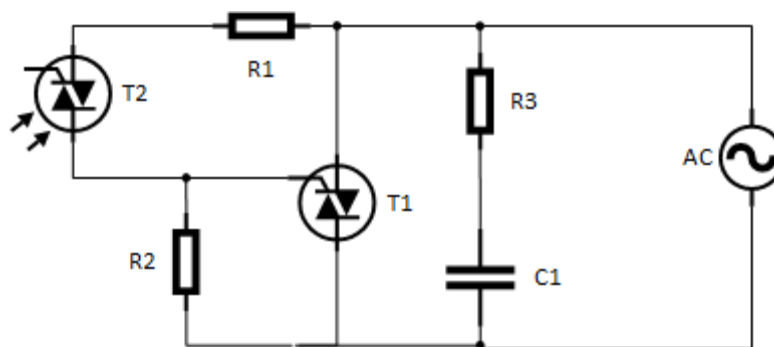


Figura 5.10 - Circuito de controlo activo.

Tendo em conta que o TRIAC T1, num estado normal, requer no máximo $1,3 \text{ V}$ e 5 mA para se dar a ativação, a corrente na resistência R2 é aproximadamente $3,6 \text{ mA}$ e a corrente em R1 é aproximadamente $8,6 \text{ mA}$.

Com isto, a potência máxima para a resistência R2 é aproximadamente $4,6656 \text{ mW}$ e a potência máxima para a resistência R1 é aproximadamente $26,6256 \text{ mW}$. Com base nestes resultados, considerou-se que as resistências implementadas devem ser de $0,25 \text{ W}$ com intuito de haver alguma margem de erro.

Uma vez definido o circuito a implementar (Figura 5.8), realizou-se a construção do *layout*, onde foi definido o tamanho da trilha, o seu trajeto, a dispersão dos componentes e o afastamento entre trilhas. O *layout* resultante é apresentado na Figura 5.11, onde se pode observar que se recorreu a duas camadas de cobre, usadas para aumentar a distância entre as trilhas.

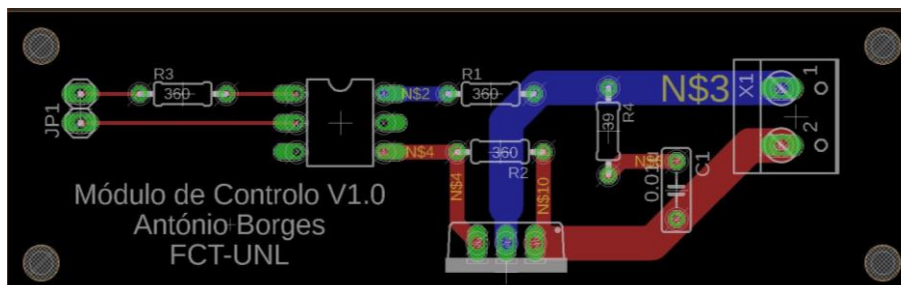


Figura 5.11- Layout PCB do módulo de controlo.

5.3 Construção do sistema

5.3.1 Adaptação sensores

Os sensores DS18B20 apresentam um cabo composto por três fios, massa, alimentação e transmissão de dados. Os fios foram soldados a um conector Jack macho de 3,5 mm para melhorar a praticabilidade da conexão destes.

5.3.2 PCB's e ligações

Em termos das ligações efetuadas no interior na caixa, há um cabo de alimentação, do qual os fios terra e neutro ligam diretamente à tomada, o fio equivalente à fase liga ao módulo de controlo. Do módulo de controlo há outro fio que conecta à fase da tomada. Desta forma, o módulo de controlo atua como interruptor da tomada.

Entre os dois módulos, apenas há dois fios de ligação, correspondentes à transmissão de sinal proveniente do microcontrolador, como se verifica na Figura 5.12.

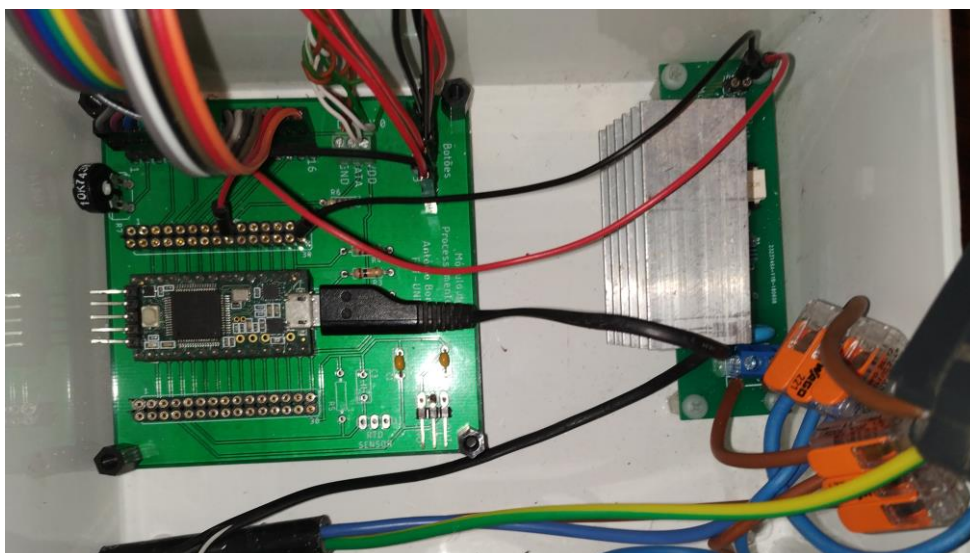


Figura 5.12 - Interior da caixa do sistema.

Os botões são compostos por dois terminais, aos quais foram soldados dois fios e posteriormente conectados aos respectivos pinos da PCB, nomeadamente ao módulo de processamento, como se verifica na Figura 5.13.

Do mesmo modo foram implementados na caixa dois conectores Jack fêmeas de 3,5 mm, e aos quais foram soldados três fios que por sua vez foram conectados ao terminal de parafusos. Isto pode ser verificado na zona direita da tampa da caixa (Figura 5.13).

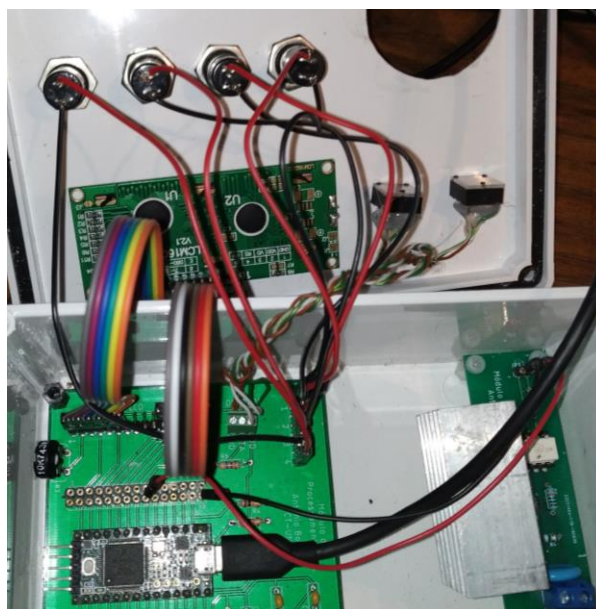


Figura 5.13 - Interior da caixa e respectiva tampa do sistema.

5.3.3 Caixa

Após a implementação e conexão de todos os módulos, houve a necessidade de os inserir num recipiente de forma a estarem protegidos e organizados. Como tal, foi utilizada uma caixa em plástico onde os componentes e a interface de utilizador foram posicionados para estarem visíveis e facilmente disponíveis ao utilizador (Figura 5.14). Para tal foi necessário efetuar alguns recortes na tampa da caixa, nomeadamente um corte para o LCD, dois cortes para os conectores fêmeas Jack, quatro cortes para os botões e um corte para a tomada.



Figura 5.14 – Vista superior da tampa do sistema.

5.3.4 Produto final

Uma vez obtida a construção da caixa, procedeu-se à união de todos os equipamentos, um aquecedor de imersão Eurojava de 1500 W, uma panela e a respetiva caixa do sistema. Note-se que o aquecedor e os respetivos sensores foram colocados como apresenta a Figura 5.15.



Figura 5.15 - Organização do aquecedor e sensores dentro da panela.

Tanto as posições dos sensores como o volume de água são fatores que influenciam a estabilidade do sistema. Como tal, é necessário garantir que os sensores permaneçam sempre no mesmo lugar e que o volume de água não seja reduzido.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta secção apresentar resultados do sistema tanto a nível de comportamento do controlador como resultados da confeção. Para tal, considera-se que o sensor 1 é o sensor posicionado na zona do aquecedor e o sensor 2 é o sensor que está posicionado na zona de colocação do alimento.

Inicialmente foi realizado testes do sistema em vazio, por forma ter uma noção do comportamento do sistema. Para uma temperatura de 66°C , durante 3 horas, foi alcançado o resultada da Figura 6.1. Sendo que na Figura 6.2 observa-se em detalhe a oscilação quando alcançada temperatura alvo.

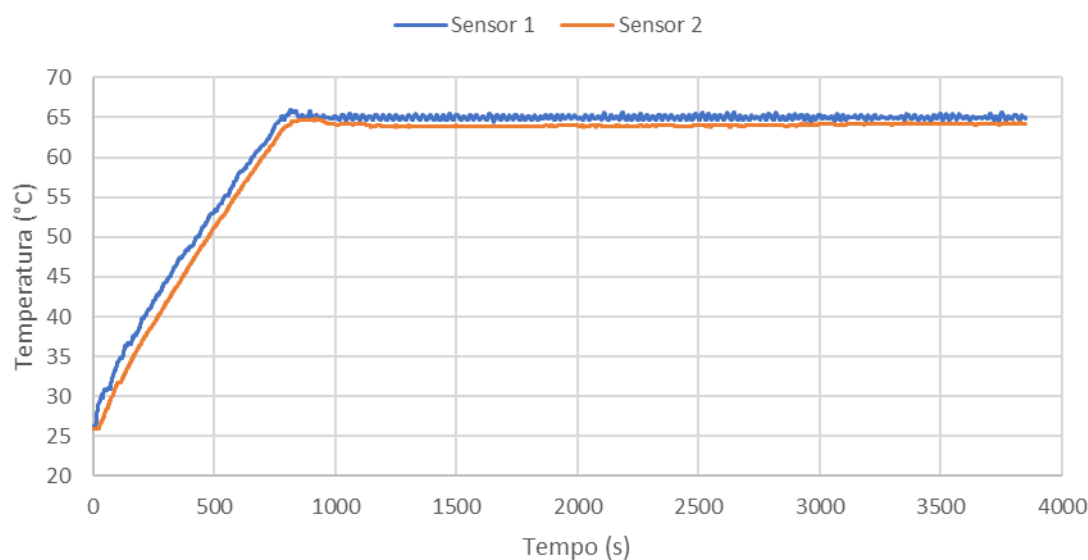


Figura 6.1 - Desempenho do sistema a uma temperatura de 66°C .

Verifica-se na Figura 6.1 uma pequena sobrelevação, resultado normal aquando o uso dos métodos de Ziegler-Nichols, isto deriva também de uma componente derivativa elevada no controlador PID, no entanto é necessário pois desta forma o sistema está apto a corrigir mais rapidamente perturbações na temperatura. Verifica-se também que ambos os sensores admitem curvas semelhantes, sendo que a diferença de valores é um pouco significativa, no entanto aparenta ser constante no tempo, pelo que este problema pode ser contornado.

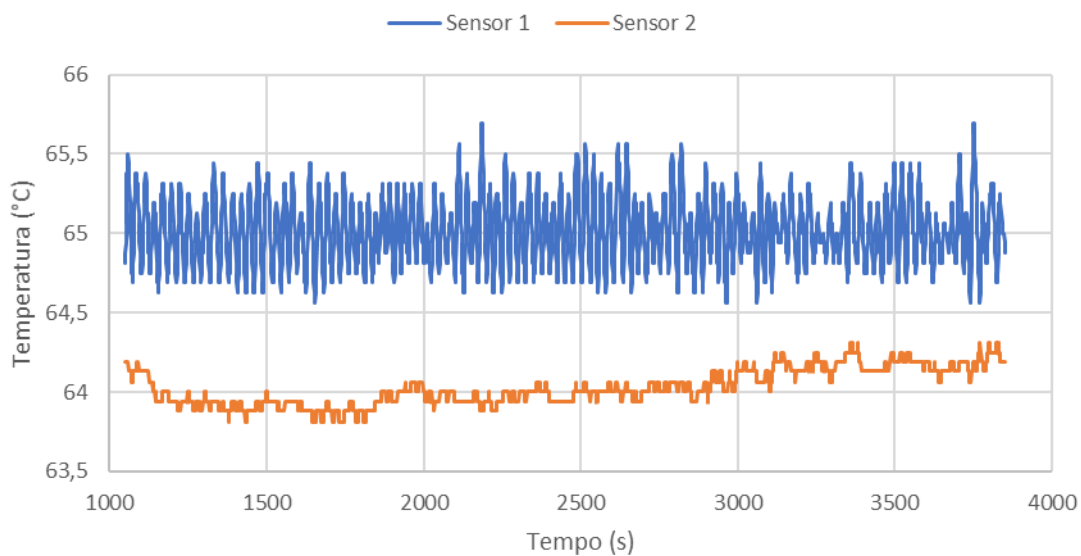


Figura 6.2 - Oscilação da temperatura a uma temperatura alvo de 66 °C.

A Figura 6.2 demonstra o comportamento do estado permanente do sistema, através desta verifica-se a presença de uma oscilação constante da temperatura, oscilação esta surge de diversos fatores, sendo que a distância do sensor ao elemento aquecedor é potencialmente um dos fatores com mais impacto. Uma distância reduzida do sensor ao elemento aquecedor permitiria um melhor controlo e por consequência uma menor amplitude na oscilação, no entanto a temperatura pretendida para o elemento aquecedor seria significativamente diferente da temperatura pretendida para a zona de colocação do alimento, com isto há a necessidade de encontrar um equilíbrio satisfatório entre a distância do sensor ao elemento aquecedor e a diferença de temperaturas entre os extremos do sistema.

De seguida é estudado a oscilação do sistema do ponto de vista de controlo e do ponto de vista da zona de colocação do alimento. Através da Figura 6.3, verifica-se que a temperatura na zona do controlador obtém uma oscilação com alguma significância, embora se verifique posteriormente que esta amplitude irá degradar-se espacialmente no sistema. Amplitude de oscilação esta apresenta um desvio padrão (zona a cinza da Figura 6.3) aproximado de 0,22 °C, onde os picos de temperatura ocorrem num intervalo de tempo muito reduzido, pelo que se considera que terá um impacto reduzido.

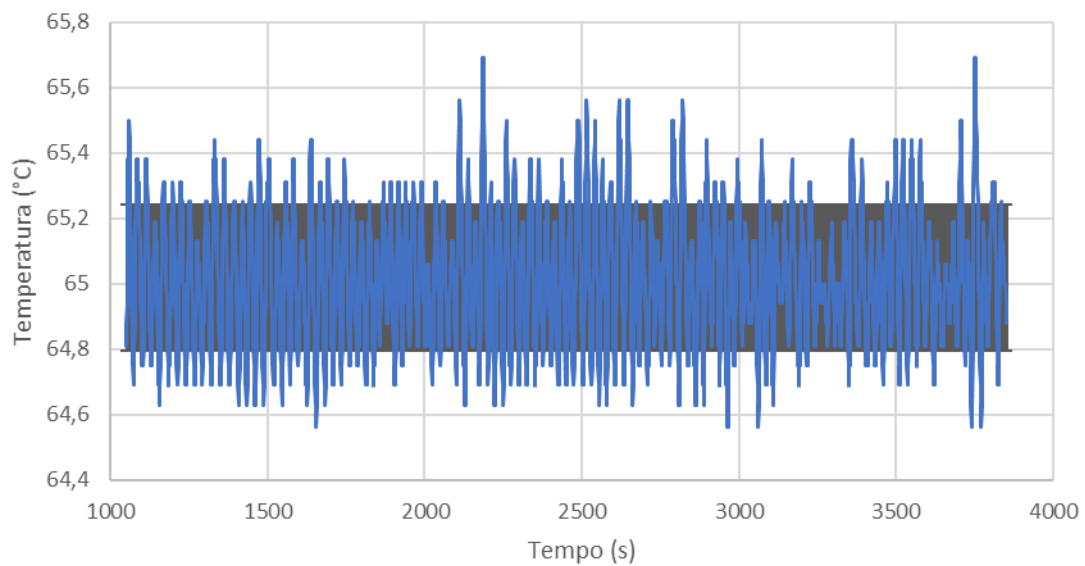


Figura 6.3 - Oscilação do sistema, em estado permanente, na zona do aquecedor.

Na Figura 6.4 está apresentado a oscilação do sistema na zona do alimento, que em comparação com a oscilação da zona do controlador, esta apresenta uma amplitude reduzida, pelo que se verifica que a transmissão de calor na água adota um comportamento de um filtro passa-baixo. Verifica-se também que o valor médio ronda os 64 °C, diferença de 1 °C da temperatura pretendida para o controlador. A amplitude da oscilação verificada apresenta um desvio padrão (zona cinza da Figura 6.4) aproximadamente 0,12 °C, satisfazendo o objetivo de uma oscilação de amplitude menor que 1 °C, pelo que à partida validará o sistema para a prática de Sous vide.

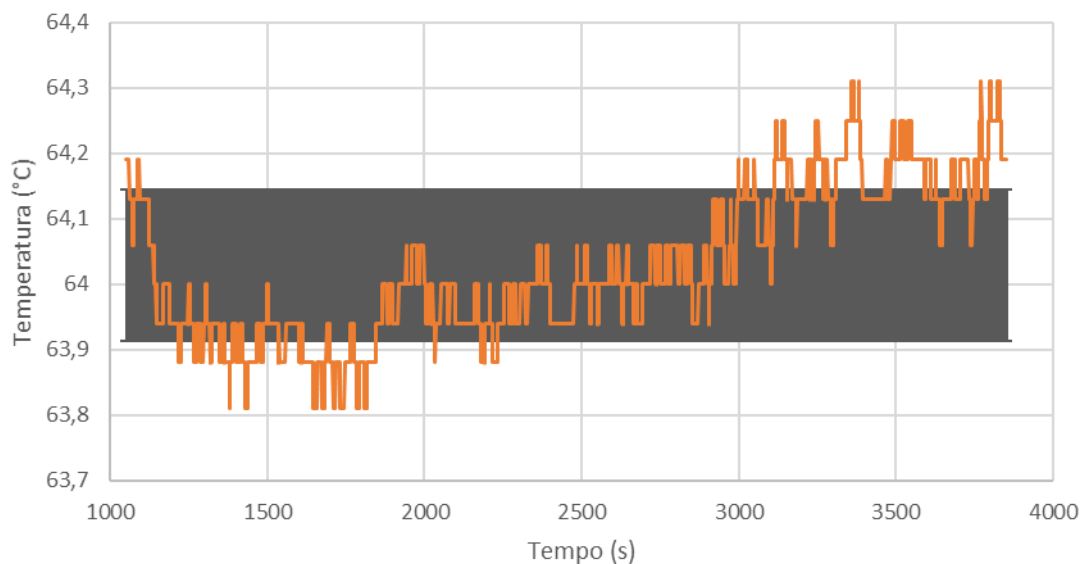


Figura 6.4 - Oscilação do sistema, em estado permanente, na zona de colocação do alimento.

Através desta análise verifica-se que o sistema tem potencial para a prática de Sous vide, no entanto pode ser alvo de afinação com o intuito de melhorar o seu comportamento.

6.1.1 Calibração do Controlador

Através do estudo anterior verifica-se que a diferença de temperatura entre os dois sensores é cerca de 1°C e que tende a ser reduzida ao longo do tempo. Esta diferença dificilmente será nula uma vez que existe dissipação de calor para o meio ambiente e não está presente algum tipo de agitador por forma a facilitar a dispersão de calor no sistema.

Após diversos testes verifica-se que a diferença de temperatura entre os dois sensores é, em média, de 1°C , pelo que se impõe que a temperatura alvo para o controlo deve acrescer 1°C da temperatura alvo para o sistema, permitindo que o alimento seja sujeito à temperatura pretendida. Esta solução não elimina por completo o desvio do segundo sensor pelo o que se deve ter cautela no caso de reprodução de receitas de longa duração.

Por forma a realizar uma melhoria do controlador PID, foi realizado uma afinação manual dos seus parâmetros. Sendo que os valores 480, 21 e 2500 para os parâmetros K_p , K_i e K_d respetivamente, permitem um comportamento mais satisfatório. Onde o sinal do sensor 1 pode ser verificado na Figura 6.5 e o sinal do sensor 2 pode ser verificado na Figura 6.6.

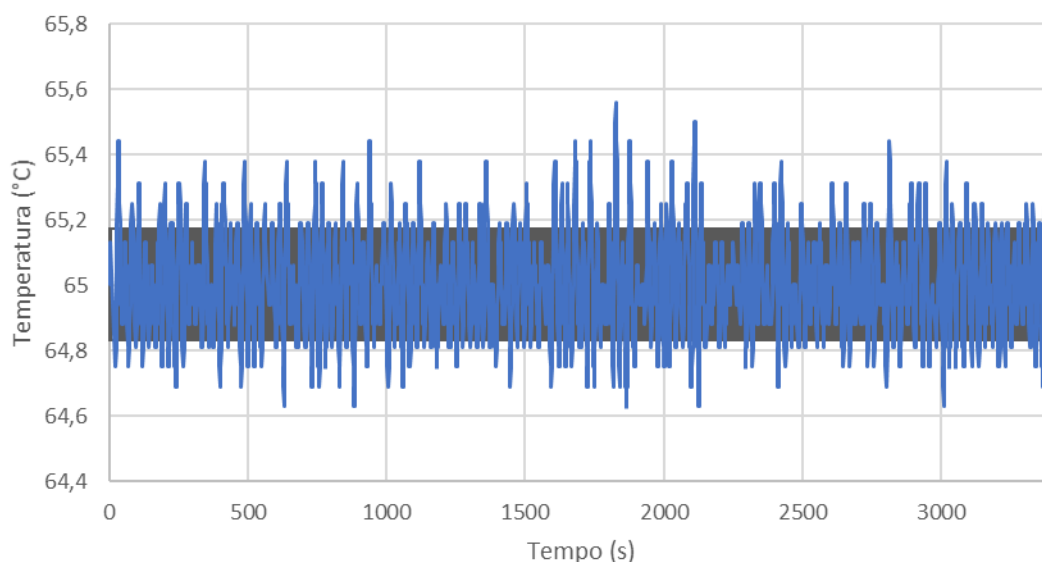


Figura 6.5 -Oscilação do sistema, em estado permanente, na zona do aquecedor.

Analisando e comparando a Figura 6.3 e a Figura 6.5 verifica-se uma redução na amplitude de oscilação. No caso na Figura 6.5, esta apresenta um desvio padrão aproximado de $0,17^{\circ}\text{C}$, que comparado com o anterior, revela um decréscimo, provando uma melhoria do controlo.

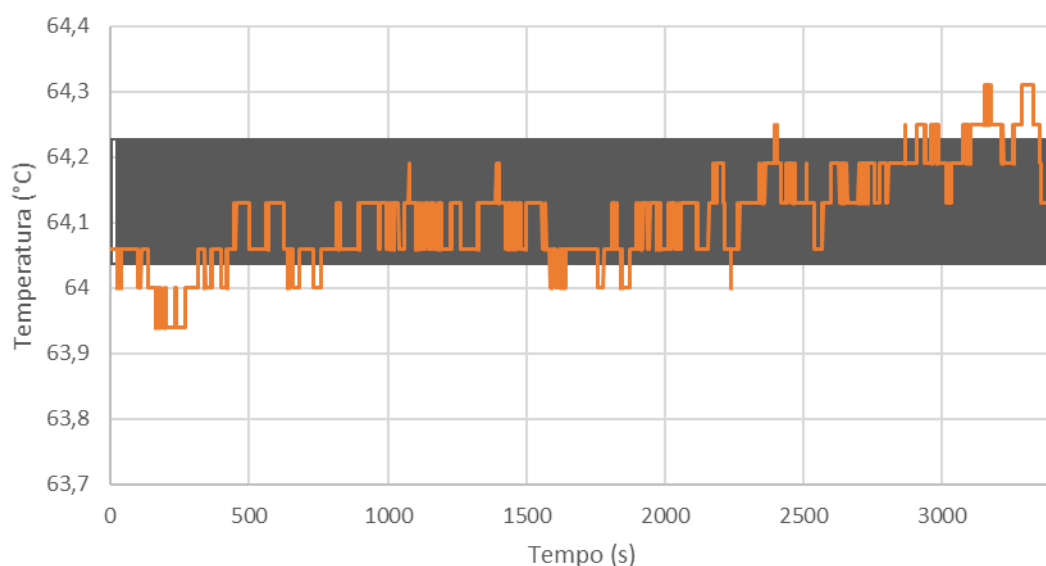


Figura 6.6 - Oscilação do sistema, em estado permanente, na zona de colocação do alimento.

Analisando e comparando a Figura 6.4 e a Figura 6.6, verifica-se que esta última tem uma amplitude de oscilação menor e com um desvio padrão de 0,09 °C, valor menor que o apresentado com os parâmetros provenientes do método Ziegler-Nichols, provando novamente uma melhoria do controlo.

6.1.2 Desempenho do Sistema

Por forma a alcançar uma avaliação final do desempenho do sistema, foi recreado o cenário da Figura 2.1, em que sujeitou ovos a diferentes temperaturas durante o período de uma hora. Com isto, verifica-se através da Figura 6.7 que resultados semelhantes foram obtidos e que permanecem dentro do expectável. De notar que as características dos ovos têm influência no resultado final, pelo o que os resultados não são exatamente ideais.

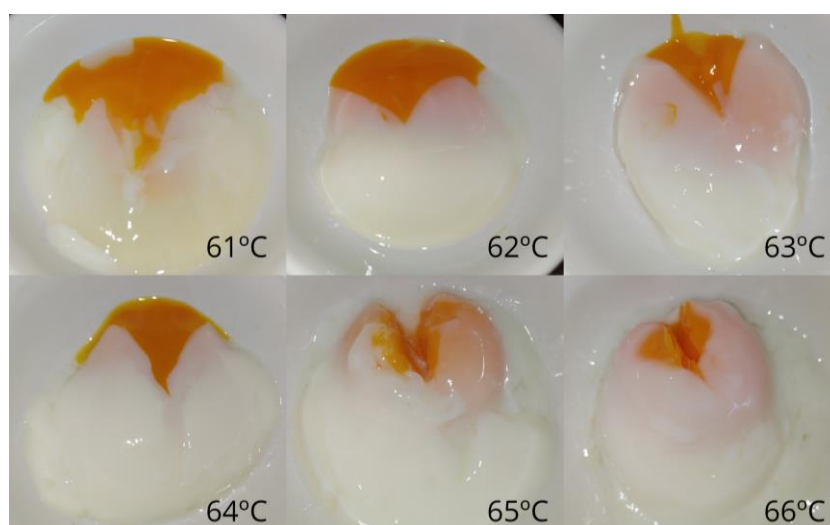


Figura 6.7 - Progressão na textura da gema com o aumento da temperatura.

Por forma a verificar o comportamento do sistema quando alvo de uma perturbação, e eventuais problemas de instabilidade, foram introduzidos abruptamente 12 cubos de gelo, de tamanho médio na água, e registou-se o comportamento deste. Comportamento este pode ser verificado na Figura 6.8.

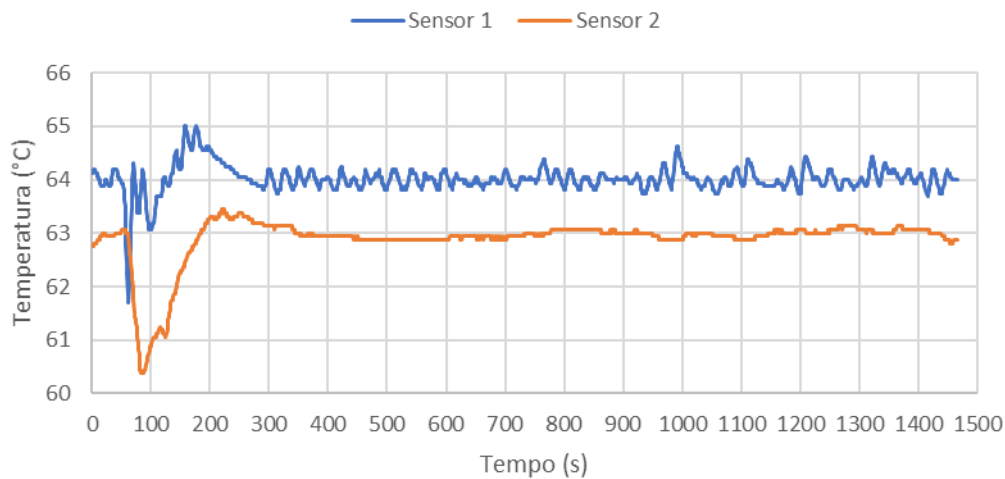


Figura 6.8 - Resultado de uma perturbação no sistema que se encontra a uma temperatura de 63°C.

Os cubos de gelos foram colocados no instante de tempo 50 segundos e verifica-se que o sistema demorou cerca de 200 segundos a estabilizar o sistema. A Figura 6.8 apresenta uma pequena sobrelevação, resultante de uma componente derivativa do controlador elevada, mas necessária uma vez que se trata de um sistema em que o aquecimento pode vir a ser mais demoroso e complicado que o arrefecimento, pois a temperatura de trabalho é significativamente superior à temperatura ambiente..

CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTO FUTURO

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o sistema apresenta resultados satisfatórios com uma amplitude de oscilação de $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a temperatura da água ao redor do aquecedor e uma variação de $0,09\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a zona onde o alimento é colocado, cumprindo o requisito imposto de desvio menor que $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. No entanto, o sistema após um longo do período de tempo pode sofrer um desvio na temperatura da zona do alimento, de aproximadamente de $0,50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com isto, assume-se que o sistema admite uma precisão que varia entre $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,50\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependendo da temperatura e período de tempo.

Apesar de uma precisão de temperatura um pouco superior às anunciadas pelas marcas de equipamentos industriais, é possível reproduzir as receitas, recomendadas por estas marcas, com um resultado semelhante.

O projeto do sistema envolveu diversos componentes, os quais se podem verificar na Tabela 4.3, juntamente com o seu custo unitário e custo total. É necessário ter em conta que os preços apresentados podem divergir consoante o fornecedor e quantidade adquirida.

Através da Tabela 4.3 verifica-se que o projeto assume um custo final de $74,65\text{ €}$, que comparado com o preço de 129 € para a Anova Precision Cooker e de 199 € para Chefsteps Joule, assume um valor inferior. Esta diferença de preços é notável, contudo, os sistemas comerciais são portadores de mais funcionalidades.

7.1 Trabalho Futuro

Este projeto pode ser alvo de diversas melhorias desde a substituição de componentes como os sensores de temperatura por componentes de melhor qualidade, melhoria do controlo do sistema, melhoria do recipiente do sistema, permitindo alcançar um sistema mais eficiente.

Potencialmente pode-se implementar uma plataforma de comunicação do sistema com um dispositivo portátil, como um telemóvel ou computador, permitindo o controlo e supervisão do sistema à distância.

Do ponto de vista de exatidão da temperatura, uma possível solução seria a criação de um algoritmo adaptativo com o objetivo de alterar a temperatura de controlo por forma a compensar a temperatura da zona do alimento ao longo do tempo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. E. Baldwin, "Sous vide cooking: A review," *Int. J. Gastron. Food Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 15–30, Jan. 2012.
- [2] S. Cylka, *The Everything Guide To Cooking Sous Vide*. Holbrook, MA, United States: Adams Media Corporation, 2015.
- [3] D. E. Baldwin, "A Pratical Guide to Sous Vide Cooking," 2008.
- [4] Anova, "What is Sous Vide," 2018. [Online]. Disponível: <https://anovaculinary.com/what-is-sous-vide/>. [Acedido: 22-Fev-2018].
- [5] Chefsteps, "What is Sous Vide," 2018. [Online]. Disponível: <https://www.chefsteps.com/activities/what-is-Sous-Vide>. [Acedido: 22-Fev-2018].
- [6] S. Supreme, "SousVide Supreme Water Oven 11L." [Online]. Disponível: <https://sousvidesupreme.com/products/SousVide-supreme-water-oven-11l-stainless-steel>. [Acedido: 23-Feb-2018].
- [7] Chefsteps, "ChefSteps Joule," 2018. [Online]. Disponível: <https://www.chefsteps.com/joule>. [Acedido: 21-Feb-2018].
- [8] Anova, "Anova Precision Cooker Specifications." [Online]. Disponível: <https://anovaculinary.com/anova-precision-cooker/specifications/>. [Acedido: 23-Feb-2018].
- [9] Anova, "User Manual." [Online]. Disponível: <https://support.anovaculinary.com/hc/en-us/articles/203861170-Anova-One-User-Manual>. [Acedido: 23-Feb-2018].
- [10] SousVide Supreme, "SousVide Supreme Demi Water Oven." [Online]. Disponível: <https://sousvidesupreme.com/products/sousvide-supreme-demi-water-oven-1>. [Acedido: 23-Feb-2018].
- [11] Gourmia, "Gourmia Products." [Online]. Disponível: <https://www.gourmia.com/products>. [Acedido: 23-Feb-2018].
- [12] PJRC, "Teensy tutorial". [Online].Disponível:<https://www.pjrc.com/teensy/tutorial.html>. [Acedido: 14-Feb-2018].
- [13] PJRC, "Teensy 3.2 & 3.1." [Online].Disponível: <https://www.pjrc.com/teensy/teensy31.html>. [Acedido: 14-Feb-2018].
- [14] G. da Silva, *Instrumentação Industrial*, 2ª Edição. Escola Superior de Tenologia de Setubal, 2004.
- [15] Kiam Heong Ang, G. Chong, and Yun Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, Jul. 2005.
- [16] T. Åström, Karl J.; Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, 2ª Edição. ISA, 1995.

- [17] R. Neves-Silva, "Controlo de Sistemas Dinâmicos," pp. 135–216, 2015.
- [18] T. Van and L. Sisken, "A Guide to Designing with Optocouplers," AN3020. California Eastern Laboratories, pp. 1–4.
- [19] Fairchild Semiconductor, "MOC3063M 6-DIP Zero-Cross Triac Driver Optocoupler," *Datasheet*, 2005.
- [20] Fairchild Semiconductor, "Applications of Zero Voltage Crossing Optically Isolated Triac Drivers Introduction," AN3004, 2002.
- [21] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices & Applications*, 4ª Edição. 2013.
- [22] STMicroelectronics, "SCR ' s AND TRIACS IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS," pp. 1–13, 2004.
- [23] M. Hill, Ed., *Transferência de Calor e Massa*, 4ª Edição. 2012.
- [24] Maxim Integrated, "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer General Description," *Datasheet*, 2015.
- [25] T. Undeland, F. Jensen, A. Steinbakk, T. Rogne, and M. Hernes, "A snubber configuration for both power transistors and GTO PHH inverters," em *1984 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1984, pp. 42–53.
- [26] IPC, "Generic Standard on Printed Board Design," IPC-2221A, pp. 40–55, 2003.

RESULTADOS DE RECEITAS

Para um bife da zona da maminha da Alcatra expôs-se uma temperatura de 54 °C durante o período de 1 hora, onde o resultado está apresentado na Figura A.1 e Figura A.2.



Figura A.1 - Bife da zona da maminha da Alcatra cozinhado a uma temperatura de 54 °C durante uma hora.



Figura A.2 – Cortes de um bife da zona da maminha da Alcatra cozinhado a uma temperatura de 54 °C durante uma hora.

De notar que o processo de alourar o bife foi realizado através de uma frigideira quente durante aproximadamente 5 minutos.

Para um peito de frango expôs-se uma temperatura de 65 °C durante o período de 1 hora, onde o resultado está apresentado na Figura A.3 e Figura A.4.



Figura A.3 - Peito de frango cozinhado a uma temperatura de 65 °C durante uma hora.



Figura A.4 – Cortes de um peito de frango cozinhado a uma temperatura de 65 °C durante uma hora.

Como referido no experimento anterior, este também sofreu o processo de alourar com uma frigideira quente durante 5 minutos.

Para um ovo de tamanho médio expôs-se uma temperatura de 66 °C durante 45 minutos e o seu resultado pode ser verificado na Figura A.5.



Figura A.5 - Ovo cozinhado a uma temperatura de 66 °C durante 45 minutos.

CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO

```
#include <PID_v1.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define botao1 0
#define botao2 1
#define botao3 2
#define botao4 3
#define TempoDebounce 200
#define Ativo 1
#define Inativo 0

#define ONE_WIRE_BUS 6
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature Sensores(&oneWire);
float DS18B20Valor = 0;
float DS18B20Valor2 = 0;

LiquidCrystal lcd(12, 11, 10, 9, 8, 7);

#define SaidaPWM 5
int SaidaSistema = 0;

double kp = 480, ki = 21, kd = 2500;
double TemperaturaPretendida, EntradaPID, SaidaPID = 0;
double TemperaturaPretendidaPID=0;
double TempoDeAtividade = 0;
PID controladorPID(&EntradaPID, &SaidaPID, &TemperaturaPretendidaPID, kp, ki, kd, DIRECT);
```

```

IntervalTimer Temporizador;
IntervalTimer OndaPWM;
volatile int minutos = 50;
volatile int segundos = 0;
int TemporizadorEstado = 0;
unsigned long TempoInterrupcao = millis();
unsigned long UltimoTempoInterrupcao = millis();
unsigned long TempoActual = millis();

int OpcaoSistema = 0;
int EstadoSistema = 0;
unsigned long TempoJanela = 750;
unsigned long JanelaTempoInicio;
unsigned long TempoInfoSerie = 1000;
unsigned long InfoSerieTempoInicio;
long int CronometroInfoSerie = 0;
unsigned long TempoConversaoInicial = 0;

void setup() {
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.print(" Sous Vide V1.0");
  Serial.begin(9600);

  pinMode(ONE_WIRE_BUS, INPUT);
  pinMode(botao4, INPUT);
  pinMode(botao3, INPUT);
  pinMode(botao2, INPUT);
  pinMode(botao1, INPUT);

  pinMode(5, OUTPUT);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(botao1), incrementaValor, FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(botao2), decrementaValor, FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(botao3), altera, FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(botao4), menu, FALLING);

  TemperaturaPretendida = 64;
  TemperaturaPretendidaPID=TemperaturaPretendida+1;

  controladorPID.SetMode(AUTOMATIC);
  controladorPID.SetSampleTime(750);
  controladorPID.SetOutputLimits(0, TempoJanela);

  Sensores.begin();
  Sensores.setResolution(12);
  Sensores.setWaitForConversion(false);
  Sensores.requestTemperatures();

  delay(2000);

  OndaPWM.priority(1);

```

```

Temporizador.priority(2);
OndaPWM.begin(geradorPWM, 1000);
Temporizador.begin(ciclo1segundo, 1000000);
}

```

```

void loop() {

  if (EstadoSistema == Inativo) {
    CronometroInfoSerie = 0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    if (OpcaoSistema == 0)
      lcd.print('-');

    lcd.print("TempPret: ");
    lcd.print(TemperaturaPretendida);
    lcd.setCursor(0, 1);
    if (OpcaoSistema == 1)
      lcd.print('-');

    lcd.print("Tempo: ");
    lcd.print(minutos);
    lcd.print(":");

    if (segundos < 10)
      lcd.print("0");

    lcd.print(segundos);

    Serial.print("TemperaturaPretendida ");
    Serial.print(TemperaturaPretendida);
    Serial.print(" EstadoSistema ");
    Serial.print(EstadoSistema);
    Serial.print(" OpcaoSistema ");
    Serial.println(OpcaoSistema);

    JanelaTempoInicio = millis();
    InfoSerieTempoInicio = millis();
    delay(200);
  }
  else {
    if (segundos == 0 && minutos == 0) {
      analogWrite(SaidaPWM, 0);
      lcd.clear();
      lcd.print("  DONE");
      delay(1000);
    }
    else {
      controloPID();
    }
  }
}

```

```

}

void leituraTemperaturas() {

    TempoActual = millis();

    if (TempoActual - TempoConversaoInicial >= 750) {
        DS18B20Valor = Sensores.getTempCByIndex(0);
        DS18B20Valor2 = Sensores.getTempCByIndex(1);
        Sensores.requestTemperatures();
        EntradaPID = DS18B20Valor2;
        TempoConversaoInicial = millis();
    }
}

void controloPID() {

    leituraTemperaturas();
    controladorPID.Compute();
    TempoDeAtividade = SaidaPID;
    TempoActual = millis();
}

void menu() {

    TempoInterrupcao = millis();

    if (TempoInterrupcao - UltimoTempoInterrupcao > TempoDebounce) {
        EstadoSistema = !EstadoSistema;
        if (EstadoSistema == Inativo) {
            Temporizador.end();
            OndaPWM.end();
            controladorPID.SetMode(MANUAL);
            SaidaPID = 0;
            analogWrite(SaidaPWM, 0);
        }
        else {
            Temporizador.begin(ciclo1segundo, 1000000);
            OndaPWM.begin(geradorPWM, 10000);
            controladorPID.SetMode(AUTOMATIC);
        }
    }
    UltimoTempoInterrupcao = TempoInterrupcao;
}

void altera() {

    TempoInterrupcao = millis();

    if (TempoInterrupcao - UltimoTempoInterrupcao > TempoDebounce) {
        if (EstadoSistema == Inativo) {

```



```

    OpcaoSistema = !OpcaoSistema;
}
else {
    TemporizadorEstado = !TemporizadorEstado;
}
}
UltimoTempoInterrupcao = TempoInterrupcao;
}

void incrementaValor() {

    TempoInterrupcao = millis();

    if (EstadoSistema == Inativo) {
        if (TempoInterrupcao - UltimoTempoInterrupcao > TempoDebounce) {
            if (OpcaoSistema == 0 && TemperaturaPretendida < 100) {
                TemperaturaPretendida += 1;
                TemperaturaPretendidaPID=TemperaturaPretendida+1;
            }
            else {
                if (minutos < 100)
                    minutos += 5;
            }
        }
    }
    UltimoTempoInterrupcao = TempoInterrupcao;
}

void decrementaValor() {

    TempoInterrupcao = millis();

    if (EstadoSistema == Inativo) {
        if (TempoInterrupcao - UltimoTempoInterrupcao > TempoDebounce) {
            if (OpcaoSistema == 0 && TemperaturaPretendida > 1) {
                TemperaturaPretendida -= 1;
                TemperaturaPretendidaPID=TemperaturaPretendida+1;
            }
            else {
                if (minutos > 5)
                    minutos -= 5;
            }
        }
    }
    UltimoTempoInterrupcao = TempoInterrupcao;
}

void ciclo1segundo() {
    if (TemporizadorEstado == Ativo) {
        // Actualizacao do temporizador
        segundos = segundos - 1;
    }
}

```

```

if (segundos == -1)
    segundos = 0;

if (segundos == 0 && minutos != 0) {
    segundos = 60;
    minutos -= 1;
}

if (minutos == 0 && segundos == 0) {
    Temporizador.end();
    TemporizadorEstado = Inativo;
}
}

if (EstadoSistema == Ativo) {
    CronometroInfoSerie += 1;
    Serial.print("TemperaturaPretendida: ");
    Serial.print(TemperaturaPretendida);
    Serial.print(" DS18B20Valor2: ");
    Serial.print(DS18B20Valor2);
    Serial.print(" DS18B20Valor: ");
    Serial.print(DS18B20Valor);
    Serial.print(" SaidaPID: ");
    Serial.print(SaidaPID);
    Serial.print(" Tempo: ");
    Serial.println(CronometroInfoSerie);

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(DS18B20Valor);
    lcd.print(" ");
    lcd.print(TemperaturaPretendida);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(DS18B20Valor2);
    lcd.print(" ");
    lcd.print(minutos);
    lcd.print(":");
    if (segundos < 10)
        lcd.print("0");

    lcd.print(segundos);
    lcd.print(" ");
    lcd.print(SaidaPID);
}
}

void geradorPWM() {
    TempoActual = millis();

    if (TempoActual - JanelaTempoInicio > TempoJanela) {
        JanelaTempoInicio = millis();
    }
}

```

```

}

if (TempoDeAtividade <= 0) {
    TempoDeAtividade = 0;
    digitalWrite(SaidaPWM, LOW);
    SaidaSistema = Inativo;
}
else if ( TempoDeAtividade > TempoActual - JanelaTempoInicio) {
    digitalWrite(SaidaPWM, HIGH);
    SaidaSistema = Ativo;
}
else if ( TempoDeAtividade < TempoActual - JanelaTempoInicio) {
    digitalWrite(SaidaPWM, LOW);
    SaidaSistema = Inativo;
}
}

```


TEENSY 3.2

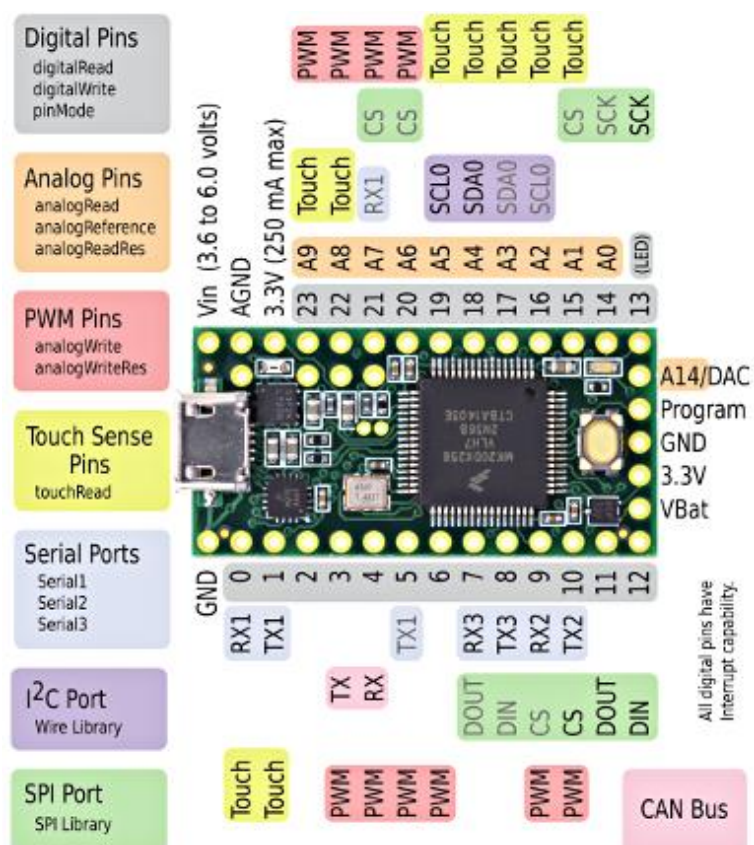


Figura C.1 - Vista superior do microcontrolador Teensy 3.2.

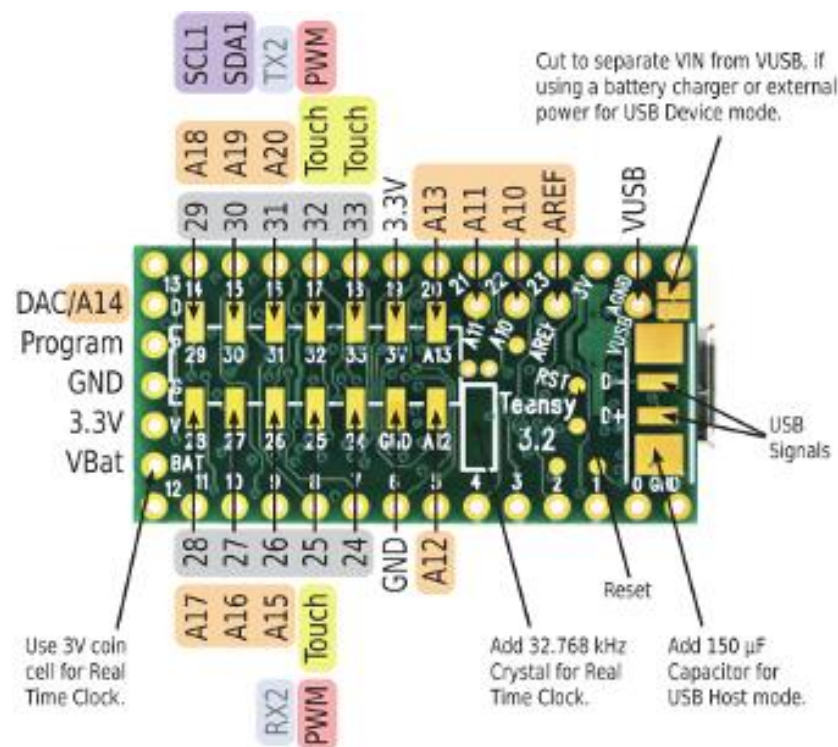


Figura C.2 - Vista inferior do microcontrolador Teensy 3.2.

PCB'S E RESPETIVOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS

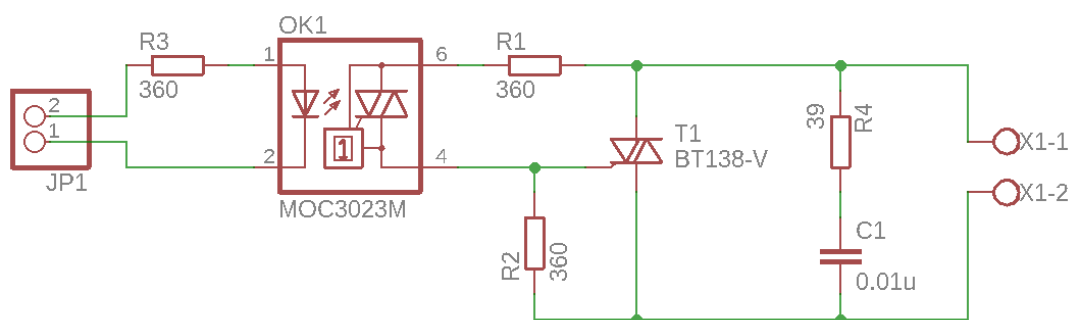


Figura D.1 - Esquemático electrónico do módulo de controlo.

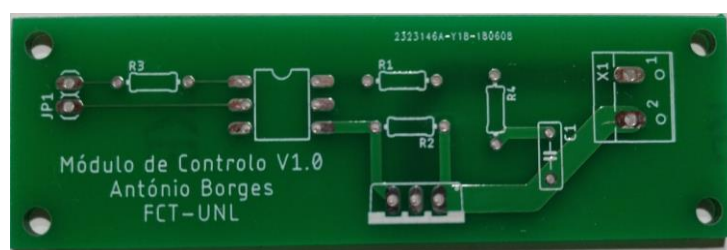


Figura D.2 - Vista superior da PCB do módulo de controlo.



Figura D.3 - Vista inferior da PCB do módulo de controlo.

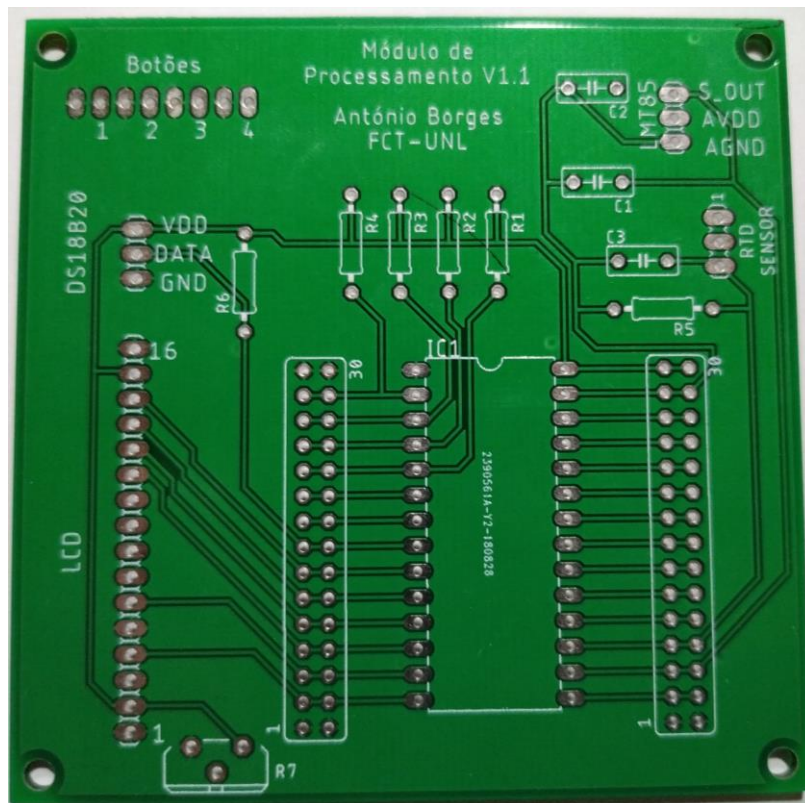


Figura D.5 - Vista superior da PCB do módulo de processamento.

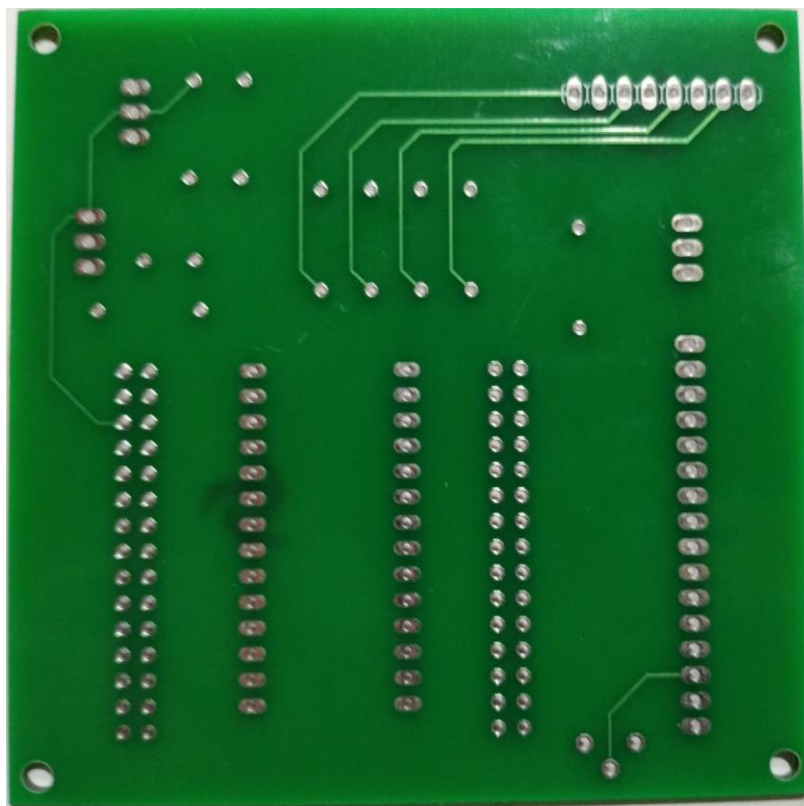


Figura D.6 - Vista inferior da PCB do módulo de processamento.